

Les découvertes spectaculaires de la mission ScanPyramids (2015-2017) et les perspectives offertes par la muographie (Octobre 2017)

(publié avec l'autorisation de la SFE (<https://sfe-egyptologie.fr>), Société Française d'Égyptologie et de l'autrice)

Guillemette Andreu-Lanoë, Conservateur général du patrimoine Directrice honoraire du département des Antiquités égyptiennes du musée du Louvre

Les révélations de la découverte d'une grande cavité à l'intérieur de la pyramide de Chéops ont fait grand bruit durant les derniers mois de l'année 2017, tant dans la presse scientifique que dans les médias plus traditionnels. C'est au tour de notre bulletin de présenter ces découvertes, sérieuses et novatrices, livrant ainsi à notre communauté des données fiables, qu'il lui reste à qualifier dans une perspective égyptologique.

Conçue et coordonnée par la faculté des ingénieurs de l'université du Caire 3 et l'institut HIP (Héritage Innovation Préservation – France), la mission ScanPyramids a démarré en Égypte en octobre 2015. Son objectif est de « scanner » les pyramides de l'Ancien Empire à l'aide de techniques non destructives et non invasives pour y trouver des structures inconnues. Cette mission interdisciplinaire intègre scientifiques, ingénieurs et artistes qui portent un nouveau regard sur ces monuments dont la construction demeure, encore à ce jour, un mystère.

La découverte de la grande cavité (Big Void) en 2017

Après plus d'une année de recherche à l'intérieur et à l'extérieur de la Grande Pyramide, l'équipe ScanPyramids a annoncé la présence d'un vide gigantesque, inconnu à ce jour, à l'aplomb de la Grande Galerie de Chéops. Baptisé ScanPyramids Big Void (SP-BV), ce vide a été détecté et confirmé par une série de campagnes muographiques menées en parallèle par trois équipes distinctes issues de l'université de Nagoya (Japon), du KEK (High Energy Accelerator Research Organization – Japon) et du CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives – France). La découverte rendue possible grâce à la muographie, technique de radiographie pénétrante issue de la physique des particules, a été publiée le 2 novembre 2017 dans la revue scientifique Nature.

Les muons, qui tombent en permanence sur la Terre à une vitesse proche de la lumière avec un débit d'environ 10000 par m² et par minute, proviennent des hautes couches de l'atmosphère 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. À l'instar des rayonsX qui traversent notre corps et permettent de visualiser notre squelette, ces particules élémentaires, sorte d'électrons lourds, peuvent traverser très facilement des roches de grande épaisseur. Des détecteurs, placés en contrebas des zones que l'on souhaite observer, permettent par accumulation dans le temps et en mesurant la distribution angulaire de ces particules de discerner les zones de vide (que les muons ont traversé sans interagir) 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, puis à accumuler suffisamment de données pour accentuer les contrastes de ces radiographies pénétrantes et augmenter les statistiques d'observation. Plus la zone à observer contient de la matière, plus les temps d'expositions doivent être

élevés. Il en est de même pour la photographie dont les temps d'expositions sont augmentés en fonction du taux de lumière (photons).

La radiographie par muons est aujourd'hui fréquemment utilisée, par exemple, dans l'observation des volcans. Le Dr Alvarez, prix Nobel de physique, fut le premier à utiliser la muographie à la fin des années soixante pour scanner la pyramide de Chéphren mais il n'y découvrit rien. Cinquante ans plus tard, les détecteurs sont nettement plus performants, tout comme les outils d'analyse et de simulation qui nécessitent de fortes puissances de calcul informatique. Dans le cadre de la mission ScanPyramids, trois types de détecteurs ont été développés:

- l'université de Nagoya utilise des détecteurs chimiques à base d'émulsions argentiques;
- le KEK a développé des scintillateurs électroniques fonctionnant avec un plastique sensible aux muons. Ces instruments ont notamment permis de scanner l'intérieur des réacteurs de la centrale de Fukushima;
- quant aux télescopes à muons du CEA, qui a rejoint la mission le 15 avril 2016, ils fonctionnent avec des détecteurs MicroMegas, inventés dans les années quatre-vingt-dix par une équipe du CEA dont le prix Nobel Georges Charpak faisait partie. Ils contiennent un mélange gazeux à base d'argon sensible aussi aux muons.

Les scintillateurs électroniques (plastique ou gaz), contrairement aux émulsions chimiques, permettent une analyse en temps réel.

Installés à l'intérieur et à l'extérieur de la pyramide de Chéops, les dispositifs de muographie ont tous pu « voir » le vide SP-BV sous différents angles et à différentes positions avec un taux de certitude supérieur à 5 Sigma. Autrement dit, la probabilité que chacune des observations – indépendantes les unes des autres – soit due au hasard est de 1 chance sur 3,5 millions. Ce taux de certitude a été exigé pour chacun des résultats muographiques car il correspond au standard requis en physique des particules pour annoncer une découverte.

Durant l'année 2016, l'équipe ScanPyramids avait testé les plaques à muons de l'université de Nagoya dans la chambre de la Reine afin de valider leur fonctionnement en détectant deux structures internes connues, localisées juste au-dessus: la chambre du Roi et la Grande Galerie (L. 47 m x H. 8 m x l. 2 m – volume de vide 600 m³). Ces premiers tests se sont avérés concluants, mais l'équipe a eu la surprise d'observer, sur ses premières muographies, un excédent de particules cosmiques comparable à celui qui signalait la Grande Galerie et dessinant une ligne parallèle à cette dernière. L'équipe ScanPyramids a alors décidé de déployer en divers endroits de la Grande Pyramide plusieurs dispositifs de muographie.

L'université de Nagoya a installé des plaques à émulsion dans la chambre de la Reine pendant plusieurs campagnes successives d'exposition aux muons allant de 49 à 74 jours. Elles étaient positionnées sur le sol de la chambre de la Reine ainsi qu'à l'arrière d'une niche se trouvant dans cette même pièce, ce qui a permis d'observer ce qui n'était encore qu'une anomalie sous deux angles de vue (position 1, position 2). Un scintillateur à muons du KEK a ensuite été placé dans la chambre de la Reine (position 2), afin de confirmer les mesures de l'université de Nagoya.

Enfin, décision a été prise de rapatrier deux télescopes du CEA et de les aligner devant la face nord pour détecter la Grande Galerie et valider les résultats des deux équipes japonaises.

Le volume de vide de SP-BV est si important, qu'au même titre que la Grande Galerie, il a pu être « vu » par ces télescopes à muons du CEA positionnés à une distance de 14 m de la face nord.

La première validation de la présence du Big Void a été réalisée par l'université de Nagoya. Chacune de ses positions (positions 1 et 2) indique au-delà de 5 Sigma la présence de la cavité SP-BV. Le KEK a ensuite confirmé à plus de 5 Sigma les observations de l'université de Nagoya. Enfin, en juillet 2017, le CEA a pu, de l'extérieur – et c'est une première – démontrer à son tour au-delà de 5 Sigma qu'il « voyait » la Grande Galerie mais aussi le vide gigantesque SP-BV au-dessus. L'intersection des cônes d'observation des équipes de muographes converge dans la même zone circonscrite.

Les différents excédents de muons mesurés par les trois équipes et les analyses statistiques permettent d'estimer que sa taille est comparable à celle de la Grande Galerie, structure architecturale majestueuse située au cœur de la pyramide de Chéops. SP-BV mesure au minimum 30 m de long. C'est en observant le ScanPyramids Big Void sous plusieurs angles (les deux points d'observation dans la chambre de la Reine et le point d'observation extérieur devant la face nord) que ses caractéristiques ont pu être affinées par triangulation.

L'équipe a ainsi conclu que SP-BV est à l'aplomb de la Grande Galerie, à une hauteur de niveau de sol comprise entre 60 et 70 m. Sa section transversale est comparable à celle de la Grande Galerie. À ce stade, toutefois, aucune conclusion n'a pu être apportée quant à son inclinaison (horizontalité ou pente) et l'équipe ignore si ce Big Void est constitué d'une ou de plusieurs structures adjacentes |

Les découvertes précédentes

Le Big Void est la troisième découverte de l'équipe ScanPyramids au sein de la pyramide de Chéops.

En octobre 2016, deux autres vides inconnus dans la pyramide de Chéops, tous deux validés avec un taux de certitude supérieur à 5 Sigma grâce à la technique de la muographie avaient été annoncés : le ScanPyramids Edge Cavity1 (SP E C1) et le ScanPyramids North Face Corridor (SP NFC).

En juin 2016, trois télescopes à muons du CEA avaient été positionnés autour de l'arête nord-est de Chéops: deux côté est, un côté nord. À l'issue d'une campagne de mesure de trois mois, le CEA a pu visualiser une cavité inconnue située à 112 m (plus ou moins -2 m) sur l'arête nord-est de la pyramide. ScanPyramids Edge Cavity1 (SP E C1) présente un volume équivalent à celui d'une petite grotte de 9 m² déjà connue, explorée et située, quant à elle, entre 81 et 83 m de hauteur.

L'objectif de cette première campagne du CEA était de valider que les télescopes à gaz étaient capables, en étant positionnés à l'extérieur, de détecter une cavité déjà connue à une distance de 150 m.

La fonction de ces deux cavités reste pour l'instant un mystère. Les télescopes du CEA ont été braqués sur d'autres arêtes de la Grande Pyramide durant l'année 2017 afin de vérifier l'existence d'autres cavités de ce type.

Le télescope Alhazen a visé l'arête nord-ouest, Brahic l'arête sud-est, Alvarez sud-ouest. Des anomalies ont été observées sur les arêtes nord-ouest et sud-est, mais les données accumulées ne sont pas suffisantes à l'heure actuelle pour affirmer que ces anomalies sont des vides.

Le second vide a été découvert derrière les chevrons monumentaux de la face nord de Chéops. Les nombreuses questions soulevées par cette zone d'intérêt ont conduit ScanPyramids à lancer une campagne complète de muographie dans le couloir descendant situé juste dessous afin de déceler la présence d'un potentiel vide inconnu.

À l'achèvement de la pyramide, il y a 4 500 ans, les chevrons étaient invisibles, cachés derrière un parement de blocs – démantelé au cours des siècles. Aujourd'hui, on peut toujours voir, dans la zone, des portions de blocs et des assises obliques, sans doute les vestiges de chevrons (fig. 9) manquants qui devaient couvrir une sorte de vide avant que les pierres soient retirées. Il existe dans la pyramide des chevrons en deux autres endroits: au-dessus de la chambre du Roi et au-dessus de la chambre de la Reine. Dans l'architecture antique, les chevrons avaient une fonction pratique, ils protégeaient une cavité/pièce et prévenaient l'effondrement de son toit.

SP-NFC avait été initialement détecté en 2016 grâce à trois plaques à émulsion de l'université de Nagoya positionnées dans le couloir descendant pendant soixante-sept jours. Ce vide indéterminé a fait l'objet d'investigations complémentaires en 2017 14 au moyen de nouvelles plaques posées dans cette même zone mais aussi dans le couloir d'Al-Mamoun – par lequel les touristes pénètrent dans la pyramide. L'objectif était double : reconfirmer à 5 Sigma la présence de SP-NFC à différentes positions et observer sous d'autres angles afin d'affiner notamment sa forme, sa distance par rapport à la face nord et sa hauteur par rapport au sol.

Ainsi, vingt-six nouvelles plaques à émulsion sensible aux muons ont été déployées autour de SP-NFC. Seule cette technique développée par l'université de Nagoya est suffisamment compacte pour pouvoir être utilisée à la fois dans le couloir descendant, très étroit, mais aussi depuis les niches du couloir d'Al-Mamoun. Vingt et une plaques ont été placées le long du couloir descendant, neuf d'entre elles exposées aux muons pendant soixante-treize jours, les douze restantes pendant soixante-trois jours. Cinq plaques, orientées vers la zone des chevrons, ont été installées dans le couloir d'Al-Mamoun pendant soixante-treize jours.

Ces nouvelles campagnes muographiques ont permis de reconfirmer, à 5 Sigma et à partir de différents « angles de vue », la présence de la cavité SP-NFC et d'affiner, notamment par triangulation, la position et les dimensions de cette cavité en forme de couloir.

Les données ainsi recueillies permettent d'estimer:

– sa distance de la face nord: entre 0,70 et 2 m;

– sa localisation à partir de la base de la pyramide : entre 17 et 23 m;

– son horizontalité ou son inclinaison vers le haut: les muographies effectuées en contrebas de SP-NFC dans le couloir d'Al-Mamoun ont permis d'éliminer seulement l'hypothèse d'un couloir incliné vers le bas et parallèle au couloir descendant;

– sa forme : de type couloir;

– sa longueur visible: 5 m minimum. Au-delà de 5 m, SP-NFC s'estompe car la masse de pierre au-dessus est trop importante et laisse passer peu de muons pendant le temps d'exposition des émulsions chimiques qui ne peut excéder quatre-vingts jours (sous peine d'altération des composés chimiques).

Et maintenant...

Il est encore trop tôt pour établir un lien entre le Big Void et le North Face Corridor. On notera toutefois que SP-BV et SP-NFC se trouvent sur le même plan vertical comme toutes les chambres et couloirs connus de la pyramide de Chéops.

La priorité est désormais, comme pour SP-NFC, de mieux comprendre SP-BV. Si sa présence et ses estimations de taille sont confirmées, les hypothèses de formes sont encore trop nombreuses: une ou plusieurs chambres successives sur un axe horizontal ou incliné, un couloir monumental de type grande galerie horizontal ou incliné, etc.

L'équipe ScanPyramids a déjà pu tester plusieurs hypothèses architecturales avec les données de l'université de Nagoya et du KEK. Elles doivent encore être confrontées aux données obtenues par le CEA, dont les télescopes offrent un point de vue complémentaire. Les simulations croisées à partir de différents points de vue muographiques permettront d'affiner, de valider ou d'invalidier les propositions qui émaneront des spécialistes de l'architecture de l'Égypte ancienne et des pyramides.

Ces simulations seront menées par l'équipe ScanPyramids composée de spécialistes en muographie (Nagoya, KEK, CEA) en collaboration avec les ingénieurs 3D et simulations de l'université du Caire, de l'institut HIP, de Dassault Systèmes et d'Emissive. Dassault Systèmes et Emissive accompagnent la mission ScanPyramids depuis son lancement en apportant leur soutien en mécénat de compétence et en technologie dans les domaines de la modélisation et de la conception 3D, de la simulation et de la réalité virtuelle. Les découvertes spectaculaires de la mission ScanPyramids.

Dans la mesure où l'on ignore jusqu'où s'enfonce le couloir SP-NFC, il reste difficile de savoir si les deux découvertes (SP-NFC et SP-BV), situées dans un même plan vertical, sont connectées l'une à l'autre.

Une coopération internationale a été lancée entre l'université du Caire, l'institut HIP, la Fondation Dassault Systèmes, le CNRS et l'INRIA pour imaginer des moyens d'exploration minimalement invasifs et en particulier un robot d'un nouveau genre, doté d'intelligence artificielle, capable de pénétrer dans une cavité et s'y déployer à partir d'un trou de 3,5 cm. En cours de conception, cet engin pourrait permettre l'exploration du couloir SP-NFC de la zone des chevrons. De cette exploration, l'égyptologie peut attendre beaucoup, personne – à l'heure actuelle – n'étant capable d'imaginer ce qu'elle révélera.

Les résultats obtenus pour la pyramide de Chéops grâce à la muographie sont majeurs. D'autant plus que cette technologie peut être mise en œuvre pour tout autre projet archéologique, dès lors qu'il faut voir à travers les pierres. Aujourd'hui, la vocation de la mission ScanPyramids est de faire progresser la connaissance des pyramides de l'Ancien Empire mais il apparaît que son objectif est aussi de faire évoluer les différentes technologies déployées dans son cadre et, plus largement, en fonction des questions archéologiques que pose le terrain.