

la position du sol initial, sur lequel les tertres avaient été construits.

Ces résultats, ainsi que les fouilles qui ont suivi, donnent une image de la vie sur les rives de l'Amazone entre l'an 500 et l'arrivée des Européens, au milieu du XII^e siècle. Les peuples de Marajo vivaient dans des territoires séparés, en

guerre les uns avec les autres. Ils cueillaient des fruits et récoltaient leurs propres cultures. Leurs habitations étaient aux sommets des tertres, surélevées par rapport au marais ; pendant plusieurs siècles, ils construisirent leurs maisons sur les ruines des précédentes. Cette culture perfectionnée était d'ori-

gine locale, contrairement à l'hypothèse selon laquelle la nature luxuriante de la forêt aurait empêché les sociétés indiennes de se complexifier.

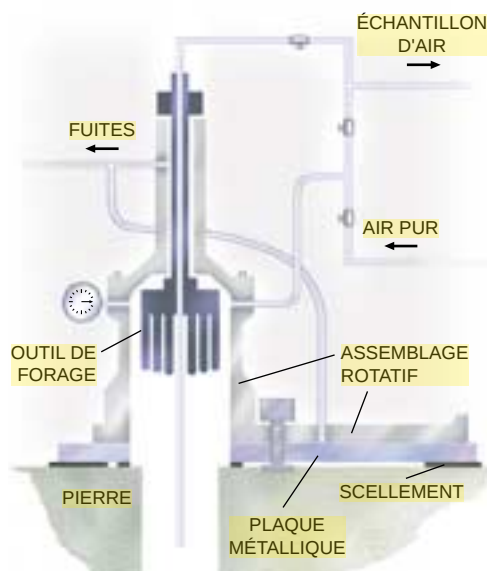
Près de Santarém, dans le Nord-Est du Brésil, A. Roosevelt a fait une découverte encore plus importante pour l'histoire du peuplement de l'Amérique, parce qu'elle démontre que, contrairement à ce que les archéologues pensaient, la poterie n'a pas été apportée en Amazonie par les Indiens du Mexique et du Pérou. Un radar à pénétration terrestre et des études sismiques ont, en effet, révélé la présence de poteries dans des couches qui étaient occupées il y a 7 000 ans. D'autres sites ont livré ensuite des poteries amazoniennes antérieures de plusieurs milliers d'années aux plus anciennes poteries trouvées à l'Ouest du continent, confirmant cette découverte.

Le principal risque auquel les sites archéologiques sont exposés après leur fouille est leur destruction, par l'érosion, par les visiteurs ou par les pilliers. Des monuments aussi célèbres et précieux que les temples d'Angkor, au Cambodge, ou le Machu Picchu, au Pérou, se dégradent. Le meilleur moyen de préserver un site est de l'étudier en y touchant le moins possible.

Les barques de Khéops

Ma première expérience d'utilisation de la télédétection dans ce but remonte à 1987, lors de travaux menés sur la Grande Pyramide de Gizeh. Construite par le pharaon Khéops il y a 4 600 ans, la pyramide a deux chambres scellées près de sa base. La première chambre, ouverte en 1954, contenait une barque démontée, longue de 43,4 mètres et large de 5,9 mètres. Il fallut 18 ans pour dégager et assembler cette embarcation royale, qui fut finalement accueillie par un « Musée nautique », construit à cet effet sur le site. Présentée au public depuis 1982, cette embarcation est très visitée.

Elle est toutefois menacée : sa longueur aurait diminué de 50 centimètres depuis qu'elle a été placée dans le musée, parce que les conditions atmosphériques à l'intérieur du musée diffèrent de celles qui régnaient dans la pyramide. Je fus alors sollicité pour étudier les conditions climatiques à l'intérieur de la seconde chambre scellée, qui contenait probablement une seconde barque, et faire des propositions pour la préservation de la première barque.



2. LA GRANDE PYRAMIDE DE KHÉOPS (en haut à gauche) contient deux chambres qui abritaient des barques royales démontées. La première a été ouverte en 1954, et la barque qu'elle contenait a été remontée, dans un musée construit près de la pyramide (ci-dessous). Toutefois, cette barque se dégrade lentement. La seconde barque a été laissée en place, et la chambre qui la contient a été étudiée de l'extérieur. En haut à droite, un ouvrier prépare un trou que l'on a recouvert d'un sas spécialement conçu pour éviter l'introduction d'air extérieur dans la chambre. Sur une plaque d'acier scellée à la pierre, un assemblage rotatif permettait soit d'aligner les trous de la plaque et de la pierre, pendant le forage et l'exploration, soit de boucher le trou lors du changement des mèches de forage ou des têtes des sondes. Une photographie prise à travers ce dispositif montre les éléments empilés de la barque.

Photographies : Farouk El-Baz. Dessin : Laurie Grace

SPOT et les cadastres romains

Selon Hérodote, les anciens Égyptiens seraient devenus géomètres afin de borner rigoureusement leurs champs, inondés chaque année par les crues du Nil. Le découpage régulier des terrains agricoles a été pratiqué à diverses époques, en différents points du Globe. Ainsi, au début de notre ère, l'administration romaine a étendu un réseau cadastral sur une partie du bassin méditerranéen. Dans le Sud de la France, des limites de parcelles actuelles conservent des traces de ce découpage, que la télédétection permet d'identifier.

Dès 1972, les images des satellites *Landsat* ont étendu les possibilités d'étude à des régions dont les photographies aériennes n'étaient pas disponibles, mais leur faible résolution au sol ne permettait qu'un repérage approximatif des directions, et seulement lorsqu'elles étaient régulières sur de grandes surfaces. Les satellites *SPOT*, dont les photographies ont une résolution de dix mètres, se rapprochent de l'outil idéal, qui aurait une résolution de quatre ou cinq mètres, la largeur moyenne des chemins limites et des haies.

L'utilisation des images *SPOT* facilite d'abord la photo-interprétation directe. L'orbite d'un satellite *SPOT* se referme sur elle-même : on peut obtenir plusieurs images, à partir du même point et sous le même angle, du secteur que l'on souhaite étudier, dans des conditions de végétation et d'humidité, donc de contraste, variées. Nous combinons ces images afin de faire ressortir les limites entre les parcelles, qui nous intéressent. En outre, on peut corriger géométriquement ces images, et les orienter au Nord : on étudie alors directement les orientations des grands alignements de limites, traces des anciens axes du cadastre. La plupart du temps, ces

traces ne sont ni parfaitement rectilignes, ni parfaitement parallèles à grande distance. Ces distorsions proviennent-elles d'imprécisions du tracé originel ou de remaniements postérieurs ? On distingue entre ces deux phénomènes en étudiant la régularité des tracés et l'aspect systématique ou non des distorsions.

Au-delà de l'étude visuelle des images, on étudie les régularités dans le tracé des limites de champs à l'aide de la transformation de Fourier. Cette opération mathématique transforme l'image en une distribution de points, illisible directement, mais qui permet de calculer les espacements les plus fréquents entre les limites de champs parallèles à une orientation donnée. On cherche alors s'il existe des couples de directions perpendiculaires pour lesquelles de nombreuses limites sont espacées des mêmes distances. Ces couples sont l'expression statistique de vestiges d'organisations à mailles périodiques orthogonales que l'on peut essayer de caractériser ensuite, par exemple par l'emploi d'une unité connue.

Ainsi, sur la transformée de Fourier d'une image *SPOT* de la région située à l'Ouest d'Orange, nous avons observé des concentrations de points correspondant à des distances de 139 à 144 mètres associées à deux directions perpendiculaires entre elles. Il en est de même pour les distances de 165 à 168 mètres, puis de 218 à 245 mètres. Ces distances ne sont pas quelconques : elles correspondent respectivement au cinquième, au quart et au tiers de centurie, unités utilisées, précisément, pour le découpage des cadastres romains.

Jean DELÉZIR, CNES
Max GUY, IFP / GDTA

Afin de prélever un échantillon de l'air de la seconde chambre, que je pensais hermétiquement scellée, comme la première, j'ai fait appel à Bob Moores, ingénieur de la Société *Black et Decker* qui avait participé à la conception d'une perceuse lunaire utilisée par les astronautes. Celui-ci mit au point un sas qui permet de percer la pierre sans mélanger l'air de l'intérieur de la chambre avec l'air de l'extérieur. Nous avons utilisé un radar de sondage terrestre afin de déterminer la forme de la pièce et de choisir un site propice au forage.

Après deux jours et demi de forage, nous avons percé la pierre sur une épaisseur de 159 centimètres. Nous avons alors inséré une sonde et prélevé de l'air à trois hauteurs différentes. Ensuite, nous avons descendu une caméra dans le trou, découvrant des hiéroglyphes sur les murs, ainsi que la seconde barque attendue. L'analyse de

l'air, la détection de moisissures sur les murs et l'observation d'un scarabée du désert vivant dans la chambre prouvaient que cette dernière communiquait avec l'extérieur. Cependant, nous n'avons pas voulu endommager la barque qui s'y trouve : nous avons donc colmaté le trou et laissé le passé royal dans l'état où nous l'avions trouvé.

L'archéologie non destructive va encore plus loin. Des archéologues anglais ont récemment localisé une cité romaine enfouie sous le village de Wroxeter, sans endommager le village ni les champs qui l'entourent. Ils ont identifié des rues, des magasins et ce qui pourrait être une église. Une simulation informatique fondée sur les mesures offre une image de cette ville densément peuplée, aujourd'hui disparue. Dans notre recherche du passé enfoui sous terre, nous en apprendrons bientôt autant sans toucher aux objets qu'en les déterrants.

Farouk EL-BAZ dirige le centre de télédétection de l'Université de Boston.

Diane EVANS, Ellen STOFAN, Thomas JONES et Linda GODWIN, *La Terre vue du ciel*, in *Pour la Science*, février 1995.

D. GOODMAN, *Ground-Penetrating Radar Simulation in Engineering and Archaeology*, in *Geophysics*, vol. 59, n° 2, pp. 224-232, février 1994.

E. Pendleton BANKS, *Remote Sensing and the Archaeology of the Silk Road*, in *Current Anthropology*, vol. 36, n° 3, p. 520, juin 1995.

Martin J.F. FOWLER, *High-Resolution Satellite Imagery in Archaeological Application ; With a Photograph of the Stonehenge Region*, in *Antiquity*, vol. 70, n° 269, pp. 667-670, septembre 1996.

A.M. MONTUFO, *The Use of Satellite Imagery and Digital Image Processing in Landscape Archaeology : A Case Study from the Island of Mallorca, Spain*, in *Geoarchaeology*, vol. 12, n° 1, pp. 71-92, janvier 1997.