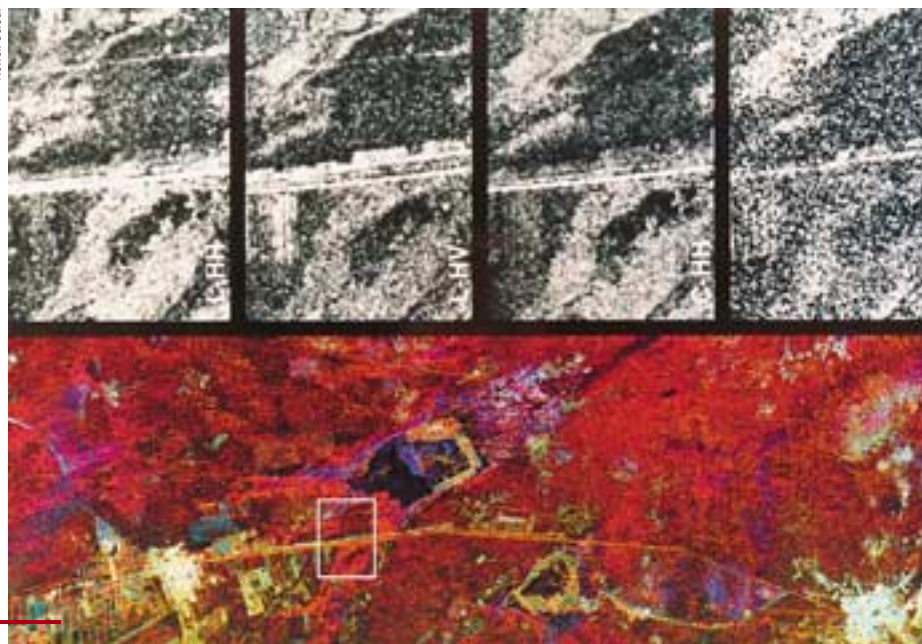




UN TRONÇON DE LA GRANDE MURAILLE DE CHINE (en bas) apparaît comme une fine bande orange. Les images radar en noir et blanc, prises dans quatre bandes de longueur d'onde, correspondent à la région délimitée par le cadre. Les deux images de gauche fournissent la vue la plus claire de deux tracés de la Muraille : la ligne claire continue date d'à peu près 600 ans ; juste au-dessus, la ligne claire discontinue est un vestige d'un mur plus ancien, construit il y a environ 1 500 ans. La Grande Muraille est bien visible sur ces images, car ses bords abrupts et lisses réfléchissent le faisceau radar. L'imagerie radar permet aux archéologues chinois d'étudier les premiers tracés de la Grande Muraille sur de longues portions. Prise de la navette Endeavour en 1994, l'image du bas montre une région de 25 kilomètres sur 75.

...et sur Terre

Des sondes électromagnétiques indiquent les différences de propriétés électriques ou magnétiques entre les couches de surface et les couches sous-jacentes d'une part, et d'autres éléments, tels des roches ou des murs enfouis d'autre part. Elles sont sensibles jusqu'à une profondeur de six mètres.

Le radar de sondage terrestre «voit» dans le sol. Les radars habituels émettent des micro-ondes qui ne pénètrent que de quelques centimètres dans la plupart des sols. En revanche, les radars de sondage terrestre emploient des ondes de fréquences proches de celles qui sont utilisées par les radios à modulation de fréquence ou par les chaînes de télévision, qui se propagent jusqu'à dix mètres de profondeur. Ces ondes se réfléchissent sur les interfaces des différentes couches de terre, de sable, d'argile, de roche ou de matériaux apportés par l'homme. Plus ces interfaces sont profondes, plus l'onde réfléchie met de temps pour retourner vers la surface, indiquant ainsi la profondeur à laquelle est enterré l'objet.

Des magnétomètres révèlent les structures souterraines qui modifient localement le champ magnétique terrestre. La terre cuite des foyers, par exemple, retient l'orientation passée du champ magnétique terrestre, et son aimantation est légèrement différente de celle du terrain environnant. Le magnétomètre à protons, le plus utilisé par les archéologues, mesure le champ magnétique local en soumettant un liquide riche en protons (de l'eau acide ou du benzène) à un champ magnétique alternatif artificiel très intense.

Des instruments de mesure de la résistivité électrique du sol indiquent des variations dans la composition des couches sous-jacentes. Les différences de résistivité enregistrées en différents points d'un site sont des indices pour la localisation des objets enfouis.

Les archéologues utilisent des sismomètres quasi identiques à ceux qui détectent et enregistrent les vibrations provoquées par des tremblements de terre, mais sensibles à des ondes sonores produites artificiellement. Le temps de déplacement d'une onde et de ses réflexions sont enregistrées, et l'on dresse ainsi une image sismique du sous-sol. Plusieurs instruments sismiques peuvent sonder le sol bien plus profondément que les autres capteurs.

champs. Leurs pensées étaient tournées vers la terre, dont ils avaient développé la connaissance. Les pasteurs de l'Ouest avaient la «sagesse du désert». Ils savaient vivre avec des précipitations capricieuses et rechercher des prairies plus verdoyantes. Afin d'échapper à la chaleur intense du soleil, ils se déplaçaient de nuit, où ils pratiquaient l'astronomie. Ces nomades avaient le regard tourné vers le ciel, cherchant la place de l'homme dans l'Univers. On retrouve cette tendance philosophique à travers toute l'histoire de l'Égypte. L'arrivée des nomades sur les rives du Nil, accroissant la population, a imposé une meilleure organisation sociale, afin de produire assez de nourriture. L'interaction culturelle des deux groupes a créé une nouvelle société, à l'origine de la civilisation antique égyptienne.

La télédétection au sol

D'autres outils de télédétection, encore peu utilisés, facilitent le travail de terrain des archéologues. Généralement, lorsque ces derniers étudient un site, ils le quadrillent avec des cordes et sondent aux intersections du quadrillage. Le risque est grand de manquer des découvertes. En revanche, la télédétection de surface indique les emplacements *a priori* les plus intéressants, réduisant les surfaces à creuser et permettant de gagner du temps.

Anna Roosevelt, du musée Field de Chicago, a utilisé de tels outils pour étudier des cultures préhistoriques de la partie brésilienne de l'Amazonie. Ses travaux ont remis en question plusieurs théories. Ainsi, sur l'île de Marajo, à l'embouchure de l'Amazone, elle a utilisé des instruments variés (voir l'encadré ci-contre) pour étudier les tertres construits par une population qui vivait de la pêche, de l'agriculture et de la cueillette. Un balayage avec un magnétomètre à protons de plusieurs tertres de trois hectares de largeur et dont la hauteur variait entre sept et dix mètres a permis de repérer les grands foyers d'argile de plusieurs maisons. Un radar de sondage terrestre a révélé des couches de terre remuées, tandis que des mesures de la conductivité électrique du sol ont montré la structure sous-jacente du terrain, avec différentes strates et des modifications liées à la présence de constructions, de foyers et de remplissage par des déchets. Un sismomètre a révélé plusieurs étapes de construction, ainsi que

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'Amazonie 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.

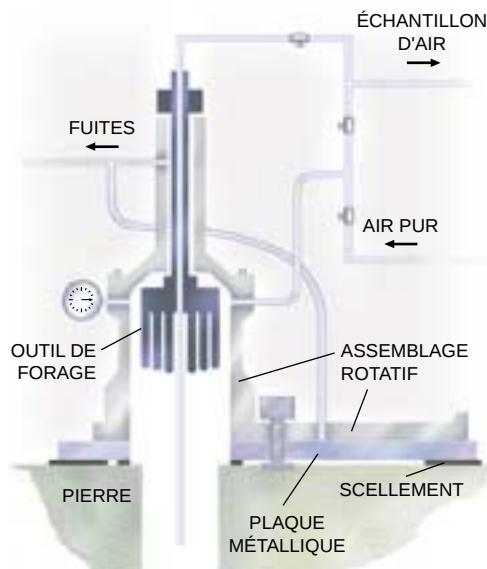
Près de Santarém, dans le Nord-Est du Brésil, A. Roosevelt a fait une découverte encore plus importante pour l'histoire du peuplement de l'Amérique, parce qu'elle démontre que, contrairement à ce que les archéologues pensaient, la poterie n'a pas été apportée en Amazonie par les Indiens du Mexique et 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.

Pourquoi certaines personnes résistent au SIDA

STEPHEN O'BRIEN • MICHAEL DEAN

La découverte d'un gène qui protège contre le SIDA ouvre de nouvelles voies de recherche sur le traitement et sur la prévention.

La médecine s'est hélas familiarisée avec les effets dévastateurs du VIH, le virus de l'immunodéficience humaine : transmis par le sang et par le sperme, le virus ne provoque parfois aucun symptôme pendant des années ; puis, après 10 à 15 ans, il détruit des cellules vitales du système immunitaire et déclenche un syndrome d'immunodéficience acquise, ou SIDA. À ce stade, le système immunitaire, devenu inefficace, n'empêche plus la prolifération, normalement jugulée, des micro-organismes pathogènes, ni le développement de cancers incurables. En France, le SIDA a déjà tué plus de 50 000 personnes, et il est devenu une des principales causes de mortalité chez les personnes âgées de 24 à 44 ans. Dans le monde, quelque 30 millions de personnes sont infectées par le virus (environ 200 000 en France).

Les traitements mis au point ces dernières années ont évité la mort à de nombreux malades. Des combinaisons de médicaments réduisent le nombre de virus dans l'organisme et restaurent la fonction immune. Ces progrès ont été justement médiatisés, mais d'autres découvertes moins connues ont récemment passionné tous ceux qui essaient de lutter contre le VIH.

On s'est longtemps demandé pourquoi certaines personnes ne sont pas infectées par le VIH, bien qu'elles soient régulièrement exposées au virus, et pourquoi certaines personnes infectées restent sans symptômes pendant très longtemps. Par exemple, avant que l'on ne dépiste systématiquement le VIH dans les dons de sang, plusieurs milliers d'hémophiles ont reçu des dérivés sanguins contaminés : beaucoup ont été infectés, mais 10 à 25 pour cent d'entre eux ont échappé au virus, et environ un pour cent des personnes séropositives continuent à être en relativement bonne santé. Ces dernières présentent peu, voire pas, de symptômes, et leur système immunitaire

