

bosons de Higgs et deviennent massifs ; simultanément, les quarks et les leptons acquièrent également une masse.

Toutefois, tandis que les masses du boson W et du Z sont prédites par le Modèle standard, les physiciens doivent mesurer les masses des quarks et des leptons pour les décrire théoriquement : ils ajustent des paramètres qui décrivent l'intensité du «couplage» de chaque type de quark et de lepton avec le boson de Higgs.

Pour un électron, très léger, l'intensité de l'interaction est égale à 3×10^{-6} ; pour un quark *top*, elle est voisine de un. Ce couplage relativement fort avec le boson de Higgs et, dans une certaine mesure, la mystique associée à la valeur un, indiquent que le quark *top* jouerait un rôle particulier, mais lequel ?

En raison de sa masse élevée, le quark *top* est certainement le plus influent, en termes de ses interactions avec les autres particules. Une mesure précise de la masse du quark *top* et de la masse du boson W conduirait à une prédiction de la masse du boson de Higgs.

Certaines descriptions de la brisure de symétrie électrofaible ne font pas apparaître de boson de Higgs. Notamment l'une de ces théories parallèles le remplace par une paire quark-antiquark *top*. S'il existe ainsi des particules lourdes qui se désintègrent en paires quark-antiquark, on devrait observer plus de quarks *top* qu'on n'en attend dans le cadre du Modèle standard.

Le top du top

Avec sa forte masse, le quark *top* devrait se désintégrer en nouvelles particules. Certains théoriciens ont proposé que quelques-uns des événements enregistrés par le détecteur CDF contiennent des particules supersymétriques (voir *La nature est-elle supersymétrique ?*, par Howard Haber et Gordon Kane, *Pour la Science*, août 1986). La supersymétrie est une symétrie postulée qui attribue à toute particule du Modèle standard des partenaires encore non découverts. Si ces partenaires existent et sont plus légers que le quark *top*, ils pourraient apparaître dans les événements que nous avons identifiés. Par exemple, un quark *top* peut se désintégrer en son partenaire supersymé-



3. PRÈS D'UN MILLIER DE PHYSICIENS et de très nombreux techniciens ont utilisé les détecteurs CDF et DØ pour découvrir le quark *top*. Les premières pages de leurs articles respectifs relatant la découverte ne contiennent que des noms.

trique (le «*stop*»), tandis qu'un «gluino» (le partenaire hypothétique du gluon) se désintégrerait en une paire *top-stop*. Aujourd'hui, les possibilités sont variées : si l'augmentation du nombre de quarks *top* due au second mécanisme était compensée par la raréfaction due au premier mécanisme, on n'observerait pas plus, ni moins de quarks et d'antiquarks *top* que le Modèle standard n'en prévoit.

La supersymétrie ne prédit pas l'existence d'un seul boson de Higgs, mais d'une famille de quatre particules ou plus. Si elles existent et sont plus légères que le quark *top*, certaines de ces particules pourraient résulter des désintégrations des quarks *top*. Les équipes CDF et DØ cherchent ces particules hypothétiques, mais elles ne les ont pas trouvées.

Nous étudions une autre question fondamentale : les quarks sont-ils vraiment des particules élémentaires, sans constituants ? L'équipe CDF a récemment mesuré plus de jets de haute énergie qu'on n'en prévoyait. Au début du siècle, Ernest Rutherford révéla la présence des noyaux au sein des atomes par une diffusion des électrons à grand angle. De manière analogue, l'excès de jets énergétiques pourrait résulter de collisions entre des constituants des quarks plus petits qu'eux.

On ne retiendra cette conclusion que lorsqu'on aura éliminé toutes les autres possibilités. Notamment, on doit d'abord vérifier que la production

«excessive» de jets ne résulte pas de petites erreurs de prédiction. Nous étudions les différentes possibilités, et les données actuelles favorisent l'une de ces explications moins spectaculaires. Pour l'instant, nous devons conclure que le quark *top*, malgré sa masse importante, est dépourvu de sous-structure.

Tandis que le Laboratoire Fermi rénove son accélérateur, les équipes CDF et DØ améliorent considérablement leur détecteur. Nous recommencerons à étudier des collisions en 1999. L'accélérateur modifié produira 20 fois plus de quarks *top* que précédemment, et les détecteurs les identifieront avec plus d'efficacité. Les deux groupes trouveront ainsi des quarks *top* 30 fois plus vite que par le passé, ce qui permettra

d'examiner plus en détail les caractéristiques de ce quark. En 2005, le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN entrera en service. Il produira deux faisceaux de protons se heurtant à 14 TeV (téra, ou 10^{12} , électronvolts), soit sept fois l'énergie du collisionneur du Laboratoire Fermi, engendrant presque une paire de quark-antiquark *top* par seconde.

Ainsi, dans quelques années, les physiciens utiliseront le quark *top* pour étudier les nombreuses questions en suspens sur la matière et les forces qui gouvernent le monde physique. Quelles nouvelles lois physiques émergeront au-delà de ce que nous connaissons aujourd'hui ?

Tony LISS est physicien à l'Université de l'Illinois. Paul TIPTON travaille à l'Université de Rochester. Ils ont tous deux participé à la construction du détecteur CDF, au Laboratoire Fermi.

Steven WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

F. ABE et al., *Observation of Top Quark Production in pp Collisions with the Collider Detector at Fermilab*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 14, pp. 2626-2631, 3 avril 1995.

S. ABACHI et al., *Observation of the Top Quark*, in *Physical Review Letters*, vol. 74, n° 14, pp. 2632-2637, 3 avril 1995.

Chris QUIGG, *Top-Ology*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 20-26, mai 1997.

L'archéologie à distance

FAROUK EL-BAZ

Les techniques de télédétection transforment le travail des archéologues, qui n'ont plus à creuser la terre pour comprendre le passé.

Rub'al-Khali, le «Quartier vide» d'Arabie, est un désert de plus de 770 000 kilomètres carrés. Les légendes rapportent qu'il était jadis plus accueillant : n'y avait-il pas la cité d'Ubar, une oasis située le long de la route de l'encens et que le Coran nomme la «Ville des Colonnes»? Thomas Lawrence lui-même, mieux connu sous le nom de Lawrence d'Arabie, a cherché, sans succès, cette «Atlantide des sables».

Où chercher Ubar? Récemment, la navette spatiale et des satellites *Landsat* ont détecté de fines lignes qui convergent en un point niché au sein des dunes. Ce point de convergence était-il un cimetière ou une ville? Des expéditions ont été organisées en 1990 et 1991, et des fouilles effectuées le long d'une route ont mis au jour la structure d'une ville fortifiée, enfouie depuis des siècles.

De l'autre côté de la planète, dans le désert du Nouveau-Mexique, la télédétection par radar de sondage terrestre a révélé l'existence d'autres vestiges, bien plus anciens. Les réflexions d'ondes radar émises dans le sol révèlent les différentes couches de terre et de roche, et même des restes de dinosaures. Des paléontologues ont ainsi dégagé des fossiles de sismosaures, dinosaures herbivores qui faisaient trembler le sol lorsqu'ils se déplaçaient.

Dans l'espace ou au sol, les instruments de télédétection sont de plus en plus utilisés par les archéologues. À l'aide de radars, de magnétomètres ou de sismomètres, ces derniers localisent plus facilement les sites à fouiller, et ils les explorent de près sans les détruire. La pelle et la pioche sont progressivement remplacées par le radar, le magnétomètre ou le sismomètre, d'un maniement plus raffiné.

Bien que des aviateurs prennent des photographies depuis le début du ^{xx}e siècle, la télédétection n'est appliquée à la Terre que depuis 1968 : lorsque

les astronautes d'*Apollo* envoient les premières images de notre planète prises de la Lune, le public abasourdi contemple la sphère bleue sur le fond noir du vide spatial. Plus tard, des astronautes en orbite autour de la Terre aperçoivent la Grande Muraille de Chine, qui court dans les montagnes chinoises, et la Grande Pyramide, qui surplombe le plateau de Gizeh, à l'Ouest du Nil.

Des ressources agricoles à l'archéologie

En 1972, la NASA lance le premier satellite *Landsat*, d'observation et d'étude des régions agricoles. L'intensité du rayonnement infrarouge réfléchi par la végétation permet la prévision du rendement des récoltes (les plantes ont un fort pic d'émission dans l'infrarouge) : plus la récolte de blé est abondante, plus la réflexion correspondante est forte. Progressivement, des géographes, des géologues et des archéologues s'intéressent à ces images. À la fin des années 1970, des archéologues utilisent les satellites *Landsat* pour localiser des ruines Maya dans la jungle dense de la péninsule du Yucatán et d'anciennes constructions dans les plaines de Mésopotamie.

Puis, dans les années 1980, Thomas Sever, de la NASA, et Payson Sheets, de l'Université du Colorado, installent des caméras à infrarouge sur des avions : les photographies prises à basse altitude sont plus précises que celles fournies par les satellites. Dans la région de Tilarán, au Nord-Ouest du Costa Rica, ils observent une ligne bizarre et sinueuse. Sur certaines images, cette marque traversait en ligne droite les collines et les vallées : des fouilles de terrain confirment que ce sont des sentiers, tracés il y a 1 000 à 2 000 ans, qui relient des cimetières, des villages et des carrières.

Des routes anciennes sont aussi détectables par satellite, comme le prouve l'exemple d'Ubar, mais les détails

révélés par les photographies aériennes sont plus précis : T. Sever et P. Sheets ont facilement trouvé l'emplacement exact des pistes qu'ils cherchaient. La même équipe a découvert, dans le canyon du Chaco, au Nouveau-Mexique, d'autres routes préhistoriques qui prouvent que la civilisation Chaco faisait partie d'un vaste réseau commercial.

En 1986, le Centre national d'études spatiales améliora notablement les outils de la télédétection grâce au satellite *SPOT*. Celui-ci produit des images multibandes, en observant simultanément et séparément dans le vert, l'orange-rouge et l'infrarouge proche. Sur ces images, les plus petits détails ont 20 mètres de côté. Un autre mode d'observation est possible, avec des capteurs sensibles à toutes les longueurs d'onde de la lumière visible : on obtient des images en noir et blanc, dont la résolution est abaissée à dix mètres (les trois premiers satellites *Landsat* avaient une précision inférieure à 80 mètres, et les deux suivants de 30 mètres). Les images de *SPOT* ne sont pas aussi précises que les photographies aériennes, mais elles couvrent des zones plus vastes, ce qui permet d'étudier une région entière. James Wiseman et ses collègues, de l'Université de Boston, ont utilisé des photographies *SPOT* du Nord-Ouest de la Grèce pour retracer l'ancienne ligne littorale de la baie d'Ammoudhia, qui abritait un port important : ils ont cartographié les anciens chenaux et les bras de mer.

L'imagerie radar spatiale est un autre outil remarquable pour l'archéologie. Elle a été mise en œuvre pour la première fois lors du vol inaugural

1. CETTE IMAGE RADAR de la péninsule arabe révèle d'anciennes pistes, invisibles du sol. Leur point de convergence serait la cité perdue d'Ubar. L'image, qui couvre une surface de plus 50 kilomètres sur 80, a été prise en 1994 de la navette spatiale *Endeavour*.



Les pistes apparaissent comme des lignes rougeâtres. Certaines ont été utilisées récemment, mais des fouilles ont révélé que quelques-unes étaient parcourues il y a plusieurs milliers d'années.

Le lit d'une rivière asséchée apparaît en blanc.

Les zones en vert indiquent la présence d'un terrain désertique calcaire.

D'immenses dunes de sable s'étendent à travers les zones colorées en magenta.

La télédétection à partir de l'espace...

de la navette spatiale, en novembre 1981, fournissant de nombreuses images de l'Est du Sahara. En 1984, puis en avril et en octobre 1994, des radars embarqués à bord de la navette spatiale ont enregistré des images de la péninsule arabe. Le plus récent de ces radars émet des ondes polarisées (dont le champ électrique est précisément orienté) dans deux directions, révélant des détails supplémentaires dans les régions photographiées.

Les origines de l'Égypte antique

J'ai notamment utilisé les images radar du désert occidental de l'Égypte, à proximité de la frontière du Soudan. Le terrain est couvert d'une couche de sable épaisse et plate, seulement ponctuée par de petites collines. Sur les images radar, nous avons découvert les lits asséchés de trois grands fleuves dont la largeur avait atteint 20 kilomètres. Les collines étaient d'anciennes îles créées par l'érosion fluviale. Des haches, découvertes par les archéologues sur les rives de ces anciennes voies navigables, ont prouvé que des hommes y ont vécu il y a 200 000 ans. Sans le radar, comment aurions-nous soupçonné le passé de cette région, enfoui sous cinq mètres de sable ?

Cette découverte confirme l'hypothèse que le désert égyptien occidental, aujourd'hui l'endroit le plus sec de la planète, a été humide il y a 5 000 à 11 000 ans. Selon Fred Wendhorf, de l'Université méthodiste méridionale, la hauteur de pluie a augmenté dans cette région de moins de un à 20 millimètres par an, il y a 11 000 ans. Des plantes herbacées et des buissons épineux, semblables à ceux qui survivent dans des environnements arides actuels, telle la Vallée de la Mort en Californie, sont alors apparus. Bien que le climat, instable, ait été marqué de nombreuses périodes de sécheresse, une culture fondée sur l'élevage se développa.

La fin de la période humide, il y a 5 000 ans, coïncide avec le début de la civilisation égyptienne antique. Ces deux événements seraient liés : l'Est du Sahara devenant plus aride, les pasteurs qui y vivaient se sont rapprochés de la seule source d'eau stable, le Nil, et se sont mêlés aux populations sédentaires qui en occupaient déjà les rives. Le mélange des cultures aurait fructifié. Les riverains vivaient en harmonie avec le fleuve, mesurant la force de ses crues annuelles et le canalisant pour irriguer leurs

Trois satellites Landsat fournissant des images numériques sont lancés dans les années 1970 sur des orbites polaires : de telles orbites survolent la totalité du Globe et se referment sur elles-mêmes. Elles permettent d'obtenir régulièrement des images des mêmes régions. Les capteurs mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi par les matériaux à la surface de la Terre dans quatre bandes de longueur d'onde : vert, orange, rouge et infrarouge proche. La résolution est de 79 mètres, et chaque image mesure 185 kilomètres de côté.

Landsat 4 et Landsat 5, dans les années 1980, fournissaient des images d'une précision de 30 mètres dans sept bandes de longueur d'onde : trois dans la lumière visible (bleu, vert et rouge), une dans l'infrarouge, deux dans l'infrarouge moyen et une dans l'infrarouge thermique. Les différences entre les matériaux en surface étaient plus visibles.

Les satellites SPOT ont été lancés à partir de février 1986 par le Centre national d'études spatiales dans un but commercial. Pour chaque longueur d'onde d'observation, *SPOT* porte une ligne de capteurs perpendiculaire à sa direction de déplacement : lorsque le satellite avance, les capteurs balayent des lignes parallèles. Les images ne sont pas déformées comme avec *Landsat* qui, portant moins de capteurs, utilisait un miroir mobile pour balayer le champ d'observation. En outre, *SPOT* porte deux systèmes identiques d'observation et peut viser en oblique : en combinant deux images prises sous des angles différents, on obtient des vues en relief.

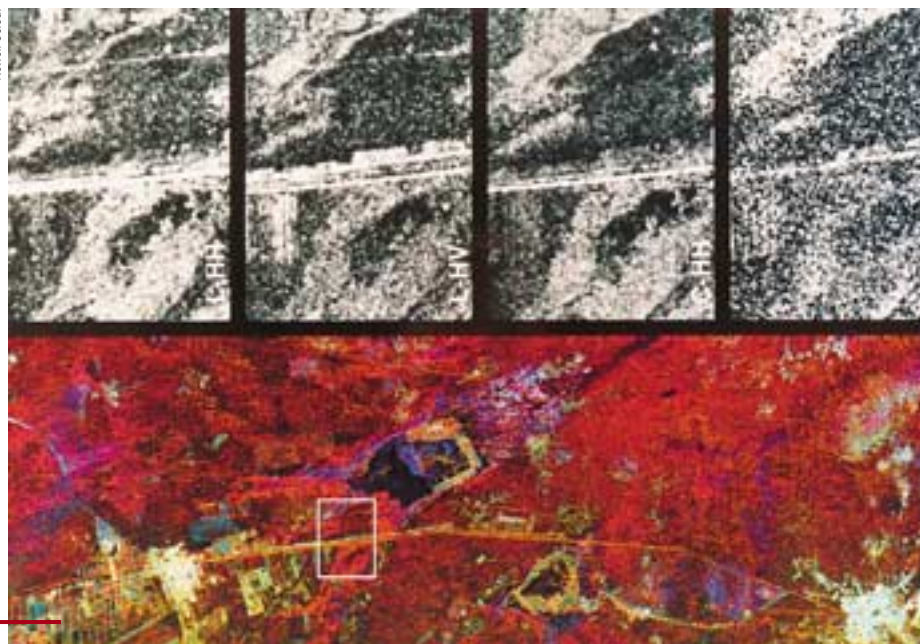
Les radars émettent des micro-ondes vers la surface de la Terre, et ils enregistrent les réflexions. Les échos renvoyés par un terrain rocailleux sont généralement forts, ou « clairs » ; ceux de surfaces plus lisses sont faibles, ou « sombres ». La combinaison de plusieurs longueurs d'onde et de plusieurs polarisations fournit des images en fausses couleurs qui révèlent des détails. Les images radar montrent bien les éléments linéaires, tels les failles et les escarpements. Elles ont ainsi révélé plusieurs tracés d'un tronçon de la Grande Muraille de Chine qui n'étaient pas visibles avec d'autres systèmes d'imagerie.

Le gouvernement américain a récemment publié des photographies prises entre 1960 et 1972 par des satellites espions. La précision de ces photographies en noir et blanc atteint deux mètres. Des prises de vues stéréophotographiques permettent de mesurer des hauteurs, informations importantes pour les recherches archéologiques. Des satellites commerciaux prendront bientôt des images avec une précision de un mètre. Quatre consortiums industriels projettent de lancer et d'utiliser de tels systèmes.



DES TERTRES construits sur une île, à l'embouchure de l'Amazone (en haut à gauche), ont été étudiés avec plusieurs méthodes de télédétection au sol (photographies de droite). L'emplacement et la nature des tertres ainsi déterminés sont indiqués sur le dessin du site (en bas à gauche).





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.

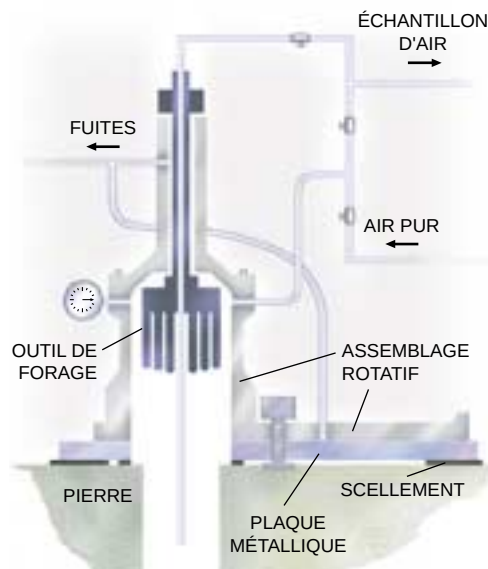
Près de Santarém, dans le Nord-Est du Brésil, A. Roosevelt a fait une découverte encore plus importante pour l'histoire du peuplement de l'Amérique, parce qu'elle démontre que, contrairement à ce que les archéologues pensaient, la poterie n'a pas été apportée en Amazonie par les Indiens du Mexique et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

