

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 balaient 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.

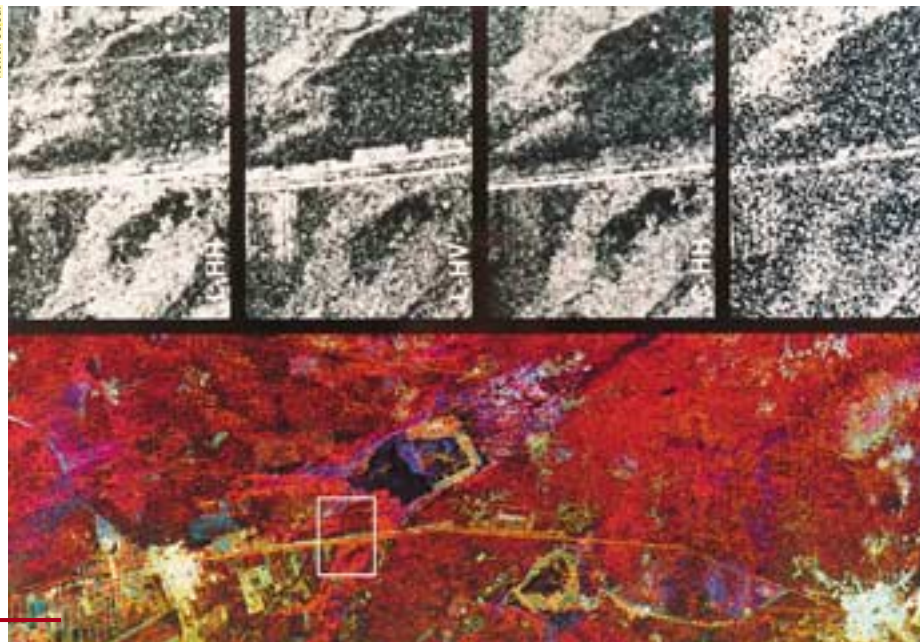
Les radars émettent des micro-ondes vers la surface de la Terre, et ils enregistrent les réflexions. Les échos renvoyés par un terrain rocailleux sont généralement forts, ou « clairs » ; ceux de surfaces plus lisses sont faibles, ou « sombres ». La combinaison de plusieurs longueurs d'onde et de plusieurs 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