

est très exagérée. Ces *low counters* (tenants d'une estimation basse), comme on les nomme dans notre jargon, s'opposent aux *high counters* (tenants d'une estimation haute) qui parlent, eux, de quelque 40 millions d'habitants dans la même région.

Pour réfuter l'idée que des dizaines de millions d'indigènes peuplaient le Nouveau Monde à l'arrivée des Européens, les *low counters* demandent: «Où sont les vestiges des cités nécessaires pour loger tant de gens?» À cette question, les *high counters* proposent deux réponses: d'une part, l'étendue et la densité des anciens villages connus seraient sous-estimées; d'autre part, il resterait des sites anciens à découvrir.

Si de telles «cités perdues» existent, on est tenté de dire qu'à l'ère spatiale, il devrait être facile de les repérer et cartographier. Après tout, la Nasa et les militaires lancent régulièrement des satellites équipés de caméras à haute résolution capables de prendre des photos dans une large plage de longueurs d'onde, ainsi que des instruments de type radar (des imageurs et des télémètres en ondes radio) ou lidar (acronyme anglais de *light detection and ranging*, désignant un télédécteur et télémètre par laser). Ces instruments envoient des impulsions électromagnétiques courtes (ondes radio et faisceaux laser) et mesurent leur temps d'aller-retour; ce temps détermine la distance qui sépare l'instrument de l'élément de surface au sol qui a réfléchi l'impulsion, ce qui permet de dresser des cartes du relief de la surface sondée.

APPRENDRE À RECONNAÎTRE DES SIGNATURES LIDAR

Le défi à relever afin de parvenir à une bonne estimation d'une population ancienne est cependant bien plus qu'une simple tâche de cartographie. Il faut en effet reconnaître les signatures des activités passées dans un paysage qui s'est modifié au fil de plusieurs siècles. Cela requiert une résolution suffisante, ce qui n'est pas le cas avec les systèmes satellitaires, à cause de leur grande vitesse de défilement par rapport au sol et de leur haute altitude. Fondée sur la prise de relevés photographiques par avion, la topographie par photogrammétrie est une autre approche possible, mais elle suppose un certain éclairage solaire et ne peut fournir d'information sur un terrain situé sous un dense couvert forestier.

Il existe heureusement une technique qui évite ces écueils: les lidars aéroportés (voir l'encadré ci-contre). Ces dispositifs embarquables sur des aéronefs légers prélèvent un grand nombre de données, assez en tout cas pour qu'il soit possible de retrancher des images obtenues les échos renvoyés par la végétation. Le traitement des échos renvoyés

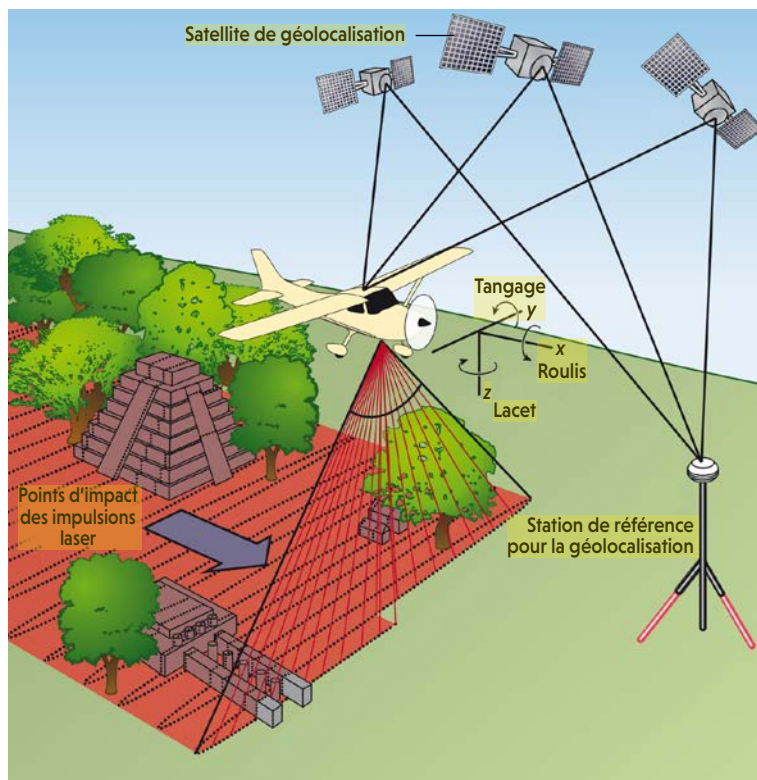
LE PRINCIPE DU LIDAR AÉROPORTÉ

Les avions équipés d'un lidar volent à basse altitude (entre 300 et 1 000 mètres au-dessus du sol) et à des vitesses relativement faibles par rapport au sol (de 60 à 80 mètres par seconde, soit moins de 300 kilomètres par heure). Un lidar aéroporté combine des données issues d'un système de géolocalisation, des gyroscopes et accéléromètres du système de navigation inertielle avec celles des scanners et détecteurs laser. La combinaison de ces différents types de données est nécessaire pour calculer les coordonnées précises de chaque point ayant réfléchi un écho laser depuis la surface.

Le cœur d'un système lidar aéroporté est constitué par un ou plusieurs lasers émettant de brèves impulsions lumineuses, le plus souvent dans l'infrarouge, d'une durée typique de quelques nanosecondes, se répétant de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de fois par seconde. Pour couvrir le terrain, les impulsions doivent y être envoyées selon deux dimensions: la première est parcourue grâce à la progression de l'avion, tandis que la seconde, qui doit être couverte de façon quasi instantanée (d'où la très haute fréquence d'émission des impulsions), lui est perpendiculaire. Elle est parcourue très vite au moyen d'un balayage optique, réalisé le plus souvent à l'aide d'un miroir oscillant ou d'un polygone en rotation. Combiné au balayage optique ultrarapide, le déplacement de l'avion permet de sonder une large bande de terrain. Les impulsions laser émises s'éloignent dans un premier temps de l'avion, avant de rencontrer soit de la végétation, soit des structures anthropiques, soit des structures géologiques (le sol), qui réfléchissent toutes des photons vers le détecteur. Ces derniers sont enregistrés par un photodétecteur, tandis qu'un chronomètre mesure le temps d'aller-retour entre le capteur et les réflecteurs. En divisant le temps de vol de la lumière par 2, puis en multipliant le résultat par la vitesse de la lumière, on obtient la distance oblique, c'est-à-dire la distance en ligne droite entre la position instantanée de l'émetteur et la surface réfléchissante.

Afin de déterminer les coordonnées de chaque réflecteur, il faut connaître non seulement la distance oblique et l'angle de balayage à l'instant d'émission de chaque impulsion, mais aussi la position géocentrique (X, Y et Z) et l'orientation (roulis, tangage et lacet) de l'avion. Cette information est produite par un système de navigation intégré (qui traite les observations des systèmes de géolocalisation par satellite) et d'une unité de mesure inertielle.

Une fois calculées toutes les positions tridimensionnelles de tous les échos laser, on obtient un énorme nuage de points (voir l'illustration de la première page). Des algorithmes déterminent alors si la surface qui a produit chaque point de données était plus probablement une structure d'origine humaine, de la végétation, ou du sol, ce qui permet de dresser une carte de la zone sondée.



► uniquement par le sol produit une grille 3D qui constitue une carte approximative de la surface sous-forestière – ce que l'on nomme un modèle altimétrique numérique. Très utiles pour nombre d'applications, les modèles altimétriques numériques le sont en particulier en archéologie, puisqu'ils permettent de repérer sur le terrain toutes les structures anthropiques ayant une signature lidar (renvoyant des échos distincts de ceux de leur environnement naturel).

UNE RÉOLUTION SPATIALE DE L'ORDRE DU MÈTRE

Ce sont particulièrement les lidars aéroportés émettant des centaines de milliers d'impulsions laser par seconde et dotés d'une électronique capable d'enregistrer plusieurs échos laser à la fois qui se sont révélés très utiles en cartographie archéologique. Même dans les denses forêts tropicales d'Amérique centrale, ces détecteurs aéroportés enregistrent suffisamment d'échos renvoyés par les constructions anciennes, les routes, les murs, les réservoirs d'eau et les terrasses agricoles pour que l'on puisse produire des images en relief de ces structures cachées par le couvert végétal. La résolution spatiale des images est de l'ordre du mètre, 10 à 20 fois meilleure que celles atteintes avec les satellites.

Même un œil non averti reconnaît alors des structures anthropiques, soit par leurs formes géométriques régulières – carrés, rectangles, cercles, lignes droites... – soit parce que leur disposition sur le territoire est aussi géométrique. Toutes les structures linéaires – routes, canaux d'irrigation, etc. – ressortent particulièrement bien. Dans certains cas cependant, il peut être difficile, même pour un expert, de déterminer si la signature lidar d'un monticule isolé est une structure géologique ou culturelle (pyramide). Les modèles altimétriques numériques venant avec des coordonnées déterminées par géolocalisation, les archéologues peuvent aller vérifier sur le terrain.

Au cours de la dernière décennie, avec le soutien de la NSF (National science foundation), le Centre américain de cartographie par laser aéroporté (NCALM, pour National center for airborne laser mapping) a mené plus de 20 projets d'intérêt archéologique au Mexique, au Belize, au Guatemala et au Honduras. La surface totale cartographiée dépasse 6 500 kilomètres carrés.

L'essentiel de ces travaux a porté sur les basses terres mayas, une région qui inclut la péninsule du Yucatán, le nord du Guatemala et le Belize. Prédominante dans cette région, la culture maya est connue pour ses majestueuses agglomérations composées de pyramides à degrés, de temples et d'autres bâtiments de pierre calcaire magistralement taillée et gravée.

Parmi les autres régions cartographiées figurent les cités de la culture Purépecha dans les hautes terres de l'État mexicain du Michoacán, aux bâtiments de pierre volcanique; les pueblos de maçonnerie (grès brut ou taillé et mortier) de la culture Chaco du sud-ouest des États-Unis; et des régions jamais cartographiées jusque-là de la jungle de la Mosquitia au Honduras, où un groupe culturel moins connu, probablement ancêtre d'un groupe actuel se nommant les Pech, a créé des tertres de terre servant de base à des bâtiments publics ou à des temples et maisons construits en bois et en chaume.

La plupart des grandes agglomérations de la zone maya sont déjà connues des archéologues, qui les étudient depuis des décennies. Celles qui sont facilement accessibles depuis les stations balnéaires, telles Cancún, Puerto Morelos, Playa del Carmen, Tulum ou Cozumel, ont été visitées par des myriades de touristes du monde entier. En dépit de cela, les images lidar ont souvent révélé que ces agglomérations étaient plus étendues qu'on ne le pensait. Elles ont aussi permis de repérer des milliers de structures auparavant inconnues telles que routes, canaux d'irrigation et autres terrassements défensifs ou agricoles.

UN PREMIER RELEVÉ PAR LIDAR AÉROPORTÉ EN 2009

Le NCALM a effectué son premier relevé lidar en 2009, en couvrant une zone d'environ 210 kilomètres carrés. Centré sur la cité maya de Caracol, dans l'ouest de l'actuel Belize, le relevé a révélé un grand nombre de bâtiments, de chaussées, de réservoirs d'eau et de terrasses agricoles éparpillés. Ces découvertes vont bien au-delà de ce que soupçonnaient les archéologues étudiant la zone depuis des décennies.

En 2013, le relevé initial a été augmenté de 1 057 kilomètres carrés supplémentaires. Arlen et Diane Chase, qui travaillent aujourd'hui à l'université du Nevada, dirigeaient alors l'équipe des archéologues. Selon eux, le lidar aéroporté a transformé l'archéologie de la région maya. De fait, les données recueillies ont amené les archéologues à conclure que vers l'an 650, quelque 140 000 Mayas vivaient dans un rayon de 100 kilomètres autour de Caracol, soit un effectif supérieur d'au moins 150% à ceux estimés précédemment.

En 2015, le NCALM a réalisé un autre relevé à grande échelle dans le département du Petén, au Guatemala. Le lidar aéroporté a couvert quelque 480 kilomètres carrés centrés sur la cité maya d'El Ceibal. Cette région comprend des zones forestières protégées, des zones agricoles modernes, des prairies ainsi que des implantations anciennes et modernes. Quand les archéologues ont visualisé les

