

> 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.

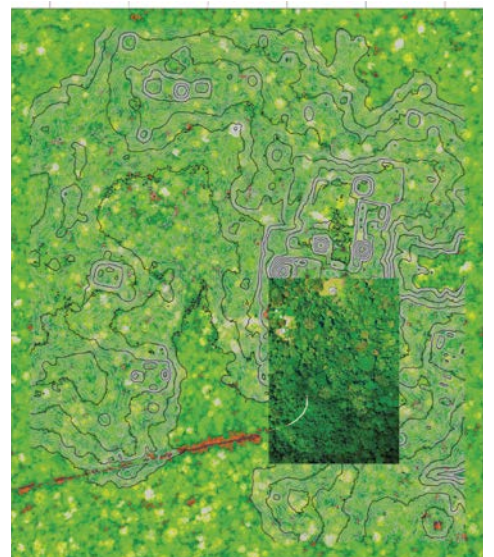
En 2013, le relevé initial a été augmenté de 1 057 kilomètres carrés supplémentaires. Arlen et Diane Chase, qui travaillent aujourd'hui à l'université du Nevada, dirigeaient alors l'équipe des archéologues. Selon eux, le lidar aéroporté a transformé l'archéologie de la région maya. De fait, les données 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

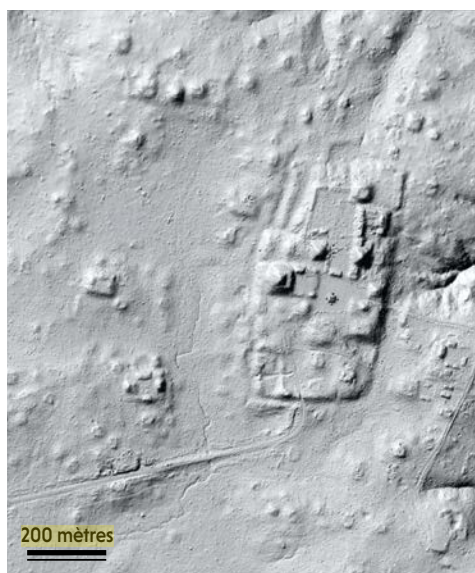




Les fouilles du site d'El Ceibal (*ci-dessus*) ont révélé que cette cité fondée il y a quelque 1 500 ans a été occupée pendant une longue période. Agglomération maya majeure, elle comprenait des milliers de bâtiments allant de grandes pyramides à de modestes maisons ; à l'apogée de la ville, on estime que 33 000 à 52 000 habitants y vivaient. Photographié depuis un avion, son quartier cérémoniel est pratiquement invisible (*à droite, image du haut*), alors qu'il apparaît clairement sur un relevé lidar (*à droite, image du bas*).



Hauteur des arbres (en mètres)
0 10 20 30 40



200 mètres

images des levés géodésiques réalisés par lidar aéroporté, ils ont été stupéfaits de découvrir des ruines inconnues dispersées dans la région tout entière. Un décompte rapide a identifié plus de 15 000 structures anciennes, dont des pyramides, des plateformes, des temples, des murs et des maisons urbaines ou rurales (*voir les images ci-dessus*).

Les chercheurs, dirigés par Takeshi Inomata, de l'université de l'Arizona, ont utilisé des données lidar et archéologiques afin d'estimer que, dans les 480 kilomètres carrés entourant El Ceibal, la population a culminé entre 33 000 et 52 000 habitants au cours de la période allant de 600 à 950 de notre ère. La densité de population semble avoir été de 780 à 1 200 habitants par kilomètre carré

dans le centre urbain d'El Ceibal, et de 2,4 à 3,7 habitants par kilomètre carré en périphérie. Une pyramide d'une dizaine de mètres de hauteur située au milieu d'une zone déjà bien explorée par les archéologues constitue la découverte la plus étonnante.

7 À 11 MILLIONS DE MAYAS

En 2016, un relevé de 2 100 kilomètres carrés juste au nord d'El Ceibal a révélé 61 480 structures artificielles, dont un grand nombre étaient inconnues, ainsi que des terrains modifiés : de probables champs, des levées de terre soit défensives soit à fonctions hydrauliques. Ce relevé a également mis au jour de nombreuses grandes agglomérations contenant des bâtiments cérémoniels. Sur >

➤ cette base, les chercheurs travaillant sur le projet *PLI* (*Pacunam lidar initiative*) estiment qu'entre l'an 600 et l'an 850, les basses terres mayas comptaient peut-être 7 à 11 millions d'habitants.

Ces chercheurs fondent leur estimation sur le nombre de structures révélées par les données lidar et sur la superficie estimée de terres cultivées, compte tenu des pratiques fermières traditionnelles de la région, de la production agricole moyenne et des besoins caloriques élémentaires d'un humain. Cette estimation est assez prudente, et tombe dans la fourchette d'un certain nombre d'autres évaluations réalisées pour cette zone et cette période. Mais pour l'équipe du projet *PLI*, les données lidar, par leur niveau de détail inédit, lui confèrent une fiabilité plus grande.

À 500 kilomètres au sud-est de la région maya, au Honduras, une jungle différente – la Mosquitia – cache les ruines d'une culture moins connue, qui serait à l'origine du groupe actuel des Pech. En 2012, le NCALM a effectué dans la Mosquitia un relevé de trois zones reculées, dans l'objectif d'aider des explorateurs recherchant la *Ciudad Blanca*. Selon la légende, une mystérieuse « Cité blanche » aurait existé dans ces parages. Dans une seule vallée, le relevé lidar a mis en évidence les traces de 19 villages, le plus gros couvrant plus de 2 kilomètres carrés. Ce village se situe le long d'un ruisseau et comporte des tertres rectilignes de 60 mètres de long, 10 mètres de large et 5 mètres de haut (*voir l'image page 79*). Disposés perpendiculairement, ils dessinent une sorte de plan publique.

Les vérifications menées trois ans plus tard dans les principaux sites repérés ont montré que ces tertres sont en terre compactée. Il n'est pas possible de déterminer si cette

Entre 600 et 850, les basses terres mayas auraient compté 7 à 11 millions d'habitants

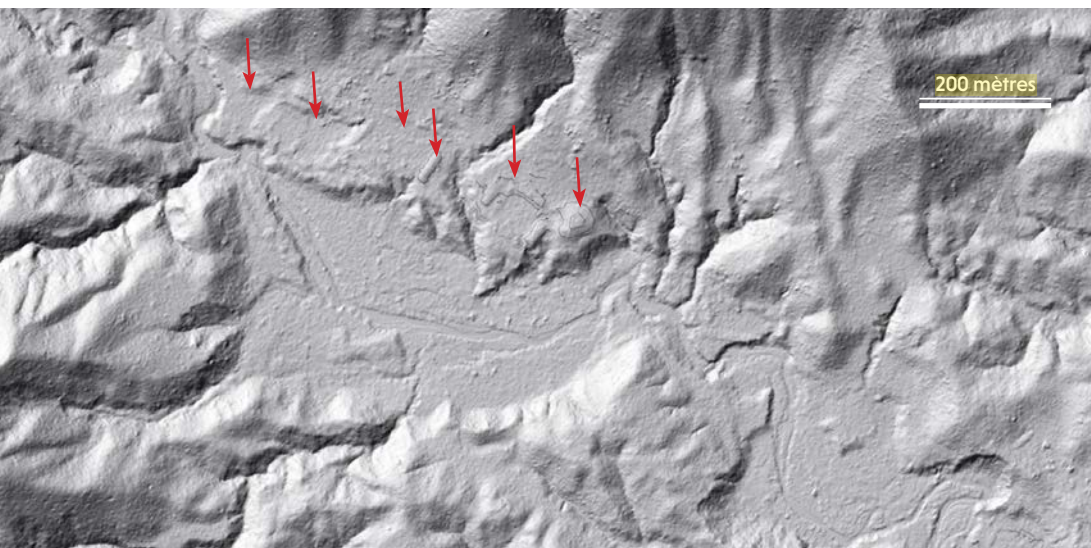
agglomération particulière ou une autre correspond à la légendaire *Ciudad Blanca*, mais les données lidar montrent que ces habitats sur monticules de terre étaient répandus dans toute la région de la Mosquitia. Comme les terrassements réalisés ont dû exiger beaucoup d'organisation et de main-d'œuvre dans le transport des matériaux, les cultures et l'irrigation, ces villages des monticules de terre suggèrent l'existence dans la région de populations importantes et de systèmes politiques complexes.

LE LIDAR EST UN OUTIL PRÉCIEUX, MAIS IL A SES LIMITES

Tous les sites explorés jusqu'ici illustrent à la fois tout ce que nous savons déjà, et tout ce qu'il nous reste encore à apprendre sur la distribution géographique des peuples qui vivaient aux Amériques avant l'arrivée des Européens, à la fin du xv^e siècle. Dans ce processus de découverte, la cartographie par lidar aéroporté est un outil précieux, mais qui a ses limites.

Le tumulus du Moine (*ci dessous, à gauche*) est le plus grand tumulus du site historique de Cahokia, sur la rive du Mississippi qui fait face à Saint Louis, dans le Missouri. Aujourd'hui, des marches et une allée ont été construites pour que les visiteurs voient mieux les quelque 120 tertres de diverses tailles et usages de cette ancienne agglomération amérindienne. Une vue d'artiste (*à droite*) montre le tumulus du Moine et un autre tumulus (*au premier plan*) tels qu'on a pu les voir à l'époque, quand des temples, des bâtiments publics ou d'autres structures de bois et de chaume occupaient leur sommet.





Dans la jungle de la Mosquitia du Honduras, une dense végétation dissimule de nombreux sites archéologiques possibles. Les relevés par lidar aéroporté font cependant apparaître à l'œil exercé des structures qui semblent d'origine humaine et non pas naturelle (flèches).

La première et la plus évidente est qu'une grande partie des implantations anciennes ont été détruites par les villages et infrastructures modernes, ce qui ne peut que fausser les estimations de la démographie ancienne. Dans les zones où la forêt a tout figé et où les anciens habitats semblent conservés dans l'état dans lequel ils ont été abandonnés, le lidar n'est en mesure que de détecter les grandes structures gouvernementales ou cérémonielles. Les petites structures, telles les fondations de petites constructions résidentielles, peuvent être aujourd'hui indétectables parce qu'elles sont enfouies sous des sédiments ou parce qu'elles ont été érodées au fil des siècles.

LES STRUCTURES REPÉRÉES N'ÉTAIENT PAS FORCÉMENT OCCUPÉES À LA MÊME PÉRIODE

Un problème plus important encore est que les structures anthropiques repérées par les archéologues dans les données lidar n'étaient pas forcément toutes occupées à la même période, ce dont il faut tenir compte pour éviter les surestimations. Déterminer quelles agglomérations étaient habitées à un moment donné est un processus long et ardu, qui implique des fouilles et des datations, éventuellement de restes humains.

Les archéologues ont tiré plusieurs enseignements de ces premières explorations au lidar aéroporté en Mésoamérique. D'une part, on a découvert des agglomérations inconnues dans presque toutes les zones cartographiées. D'autre part, les sites déjà connus se sont révélés bien plus vastes et plus complexes qu'on ne le pensait. Il est aussi apparu que les investissements faits dans les infrastructures, la gestion de l'eau, le transport et la défense étaient bien plus importants qu'on ne l'avait précédemment identifié ou imaginé.

Toutes ces nouvelles données changent nos hypothèses sur le peuplement, l'agriculture, l'aménagement des sols, le commerce, la guerre, les structures politiques et les interactions sociales précolombiennes.

ENCORE DE VASTES ÉTENDUES À EXPLORER

Étant donné qu'il reste de vastes étendues couvertes de jungles peu explorées – la Mosquitia au Honduras et au Nicaragua, le Darién au Panama et dans le nord de la Colombie, les hautes forêts brumeuses des Andes, et la plus grande de toutes, la forêt amazonienne –, il est probable que le lidar continuera à nous révéler de nouvelles cités disparues et d'autres installations humaines oubliées, ce qui devrait nous faire revoir régulièrement à la hausse les effectifs de la population précolombienne.

Les importants efforts des archéologues déployés jusqu'à présent pour cartographier au lidar les zones archéologiques du Mexique et d'Amérique centrale ont révélé moins de 5% des zones de la région couvertes par une forêt dense. Le lidar aéroporté pourrait couvrir le reste en une décennie environ, pourvu qu'un soutien financier suffisant soit garanti. Le grand défi consistera alors à recruter l'armée d'archéologues nécessaire afin d'analyser, d'interpréter et de valider sur le terrain toutes les données recueillies à distance.

Nous espérons que ces futures observations au lidar aéroporté produiront une meilleure estimation de la population précolombienne, et permettront de mettre enfin d'accord les *low counters* et les *high counters*. Même s'il s'avère que cet objectif est inatteignable, le lidar aéroporté continuera de nous alimenter en découvertes fascinantes sur les peuples qui habitaient les Amériques avant l'arrivée des Européens. ■

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

BIBLIOGRAPHIE

M. A. Canuto et al., **Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala**, *Science*, vol. 361, pp. 1313-1314, 2018.

T. Inomata et al., **Archaeological applications of airborne LiDAR to examine social changes in the Ceibal region of the Maya lowlands**, *Plos One*, vol. 13(2), e0191619, 2018.

W. E. Carter et al., **Archaeology from the air**, *American Scientist*, vol. 104, pp. 28-35, 2016.

A. F. Chase et al., **The use of LiDAR in understanding the ancient Maya landscape**, *Advances in Archaeological Practice*, vol. 2(3), pp. 208-221, 2014.