

L'Organisation mondiale de la santé, elles sont responsables de plus d'un million de décès chaque année dans le monde, principalement dans les pays en développement. En 2016, Alexandra Willis, de l'Imperial College London, et ses collègues ont montré qu'en injectant *B. bacteriovorus* dans le rhombencéphale (la partie postérieure du cerveau) de larves de poissons-zèbres infectées par *Shigella flexneri*, les Balo augmentaient de 35% leur taux de survie, agissant conjointement avec le système immunitaire des larves avant que celui-ci n'élimine *B. bacteriovorus* à son tour. Le système immunitaire du poisson-zèbre présentant de grandes similarités avec celui de l'humain, cette stratégie fonctionnerait-elle aussi chez ce dernier?

PROTÉGER LES ÉLEVAGES DE CREVETTES

Outre les humains, l'aquaculture et l'élevage sont tout aussi concernés par l'essor des bactéries antibiorésistantes. Chez les crevettes à pattes blanches (*Penaeus vannamei*) notamment, élevées en eau douce dans divers pays d'Amérique et d'Asie, plusieurs bactéries du genre *Vibrio*, comme *V. parahaemolyticus* et *V. cholerae* (le bacille du choléra), provoquent des épidémies généralisées et sont responsables d'une perte atteignant parfois 90% de l'élevage, l'infection n'étant pas toujours contrôlable par des antibiotiques. Or en Chine, notamment, l'aquaculture produit annuellement 300 000 tonnes de ces crevettes à destination alimentaire.

Dans ce cas encore, les Balo offrent une piste intéressante. En 2015, Haipeng Cao, de la Shanghai Ocean University, et ses collègues, sont parvenus à éradiquer dix souches pathogènes différentes de *Vibrio* en culture en les incubant avec le Balo *Bdellovibrio bacteriovorus*. De plus, le prédateur a indéniablement pour les crevettes un effet protecteur contre les infections à *Vibrio*: en reproduisant l'expérience *in vivo*, les chercheurs ont observé que le taux de survie des crevettes augmentait de plus de 60%.

Il semble par ailleurs que les bactéries prédatrices ne soient pas nocives pour les cultures cellulaires humaines ou animales, aucune maladie n'ayant été associée ou attribuée à une infection par des Balo. Contrairement à ce que l'on observe avec d'autres bactéries ou des bactériophages employés en thérapie phagique, ils ne déclenchent qu'une faible réaction inflammatoire et, à ce jour, aucune résistance permanente n'a été décelée chez leurs proies.

Les Balo sont encore peu étudiés malgré le grand potentiel qu'ils recèlent et le nouvel engouement qu'ils suscitent. On est encore loin des 6990 articles que le portail Pubmed a référencés sur les bactéries *Staphylococcus* pour la seule année 2018! Néanmoins, il ne fait plus aucun doute que ces bactéries prédatrices gageront en

DES VÉSICULES SOUS-ESTIMÉES

Dès les années 1960, on s'est aperçu que les bactéries et les cellules eucaryotes (c'est-à-dire comportant un noyau) sécrétaient des vésicules membranaires. Depuis, on sait que c'est aussi le cas des archées, le troisième domaine du vivant. Il s'agit donc d'un mécanisme très conservé au fil de l'évolution. Et beaucoup plus répandu qu'on ne le pensait, comme l'ont observé Steven Biller, de l'institut de technologie du Massachusetts, et ses collègues en 2014 en montrant que les cyanobactéries *Prochlorococcus* produisent d'étonnantes quantités de ces vésicules dans leur milieu naturel.

Il s'agit de petits compartiments clos formés à partir de membranes cellulaires, sécrétés dans le milieu extérieur ou intervenant dans le trafic intracellulaire. De formes, tailles, compositions et fonctions variées (défense contre certaines infections, protection antivirale, libération de facteurs de virulence, matériel de transport génétique, moyen de communication entre organismes, leurre, nourriture pour organismes unicellulaires, inhibiteur de croissance...), ces vésicules sont produites par une diversité de mécanismes. Dans leur environnement, elles sont capables d'interagir avec des cellules et même des virus aquatiques, avec lesquels il arrive qu'elles soient confondues. En effet, de taille comparable (entre 40 et 230 nanomètres), elles sont parfois présentes en nombre très élevé (supérieur à 10⁶ vésicules par millilitre). Les virus aquatiques sont donc probablement un peu moins nombreux qu'on ne le pensait, et leur impact sur l'écosystème plus faible. Les bactéries prédatrices de bactéries y ont dès lors toute leur place.

importance dans un futur proche, tant leurs applications potentielles sont nombreuses (voir la figure page ci-contre). Il reste cependant encore beaucoup à comprendre le rôle des Balo dans les milieux naturels, qui n'ont encore jamais été étudiés de façon globale.

BIBLIOGRAPHIE

J. A. Ezzedine et S. Jacquet, **Bactéries prédatrices : zoom sur les Bdellovibrio et organismes apparentés (BALOs)**, *N3AF*, vol. 2, 2019.

B. Paix et al., **Diversity, dynamics and distribution of Bdellovibrio and like organisms in peri-alpine lakes**, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 85, article 02494-18, 2019.

S. Jacquet et C. Depecker, **Les virus, piliers de la vie marine**, *Pour la Science Hors-Série n° 104*, pp. 36-43, 2019.

E. Jurkevitch et Y. Davidov, **Phylogenetic diversity and evolution of predatory prokaryotes**, dans E. Jurkevitch (éd.), *Predatory Prokaryotes – Biology, Ecology and Evolution*, Springer, 2006.

F. Azam et al., **The ecological role of water-column microbes in the sea**, *Marine Ecology Progress Series*, vol. 10, pp. 257-263, 1983.

PLEIN DE BALO DANS LES LACS PÉRIALPINS

Aujourd'hui, les nouvelles techniques de séquençage à haut débit et de la bio-informatique offrent la possibilité de décrypter la diversité de ces bactéries et leurs interactions avec l'environnement. Fin 2017, nous avons ainsi lancé un projet dans ce sens, visant à étudier la diversité, la structure, l'abondance et les rôles des Balo dans divers écosystèmes aquatiques. Nos premiers résultats sont déjà très prometteurs. Nous avons découvert que certains prédateurs bactériens étaient parfois très abondants dans les grands lacs périalpins. La famille des Peredibacteraceae – en particulier la bactérie *Peredibacter starrii*, majoritaire – représentait parfois jusqu'à 7% de l'abondance totale des bactéries, tandis que les deux autres familles analysées, les Bdellovibrionaceae et les Bacteriovoraceae, restaient très peu représentées. Ces trois familles occupaient d'ailleurs des zones différentes de la colonne d'eau, les Peredibacteraceae dominant près de la surface, tandis que les Bdellovibrionaceae et les Bacteriovoraceae étaient plus abondantes en profondeur. Stratégies de vie différentes? Niches écologiques distinctes? L'avenir nous le dira. Une chose est sûre, la prochaine fois que vous vous baignerez dans le lac Léman, vous ne le regarderez pas de la même façon. ■

L'ESSENTIEL

> Les effectifs de la population précolombienne n'ont jamais été évalués de façon fiable.

> Aujourd'hui, les relevés effectués par lidar aéroporté permettent de repérer des vestiges archéologiques cachés par la végétation et de les cartographier.

> Les premières campagnes menées en Mésomérique montrent que les territoires sondés étaient bien plus peuplés et exploités qu'on ne le pensait.

> Ce n'est qu'un début, car ces campagnes n'ont couvert qu'une partie infime de ce qui reste à explorer.

LES AUTEURS



WILLIAM E. CARTER
consultant en géodésie
et ancien professeur de génie
civil à l'université de Houston,
au Texas



RAMESH L. SHRESTHA
directeur du Centre américain
de cartographie par laser
aéroporté (NCALM)
à l'université de Houston

Les Précolombiens dénombrés au lidar

Grâce à la technique du lidar aéroporté, les archéologues repèrent et cartographient des sites précolombiens cachés par une épaisse forêt. Ce qui permet de mieux quantifier les populations du passé.

Les prêtres, soldats ou marchands européens qui, à la fin du xvi^e siècle, découvraient le Nouveau Monde ont souvent exprimé leur surprise devant le nombre des agglomérations amérindiennes. Ont-ils tenté de les recenser? Nous l'ignorons. En tout cas, aucune estimation ne nous est parvenue, ce qui est bien dommage pour les archéologues et les anthropologues qui étudient l'Amérique précolombienne. Toutefois, depuis l'apparition d'une nouvelle technique – la cartographie par lidar aéroporté –, le recensement à grande échelle des cités, des villages, champs et autres infrastructures précolombiennes devient envisageable.

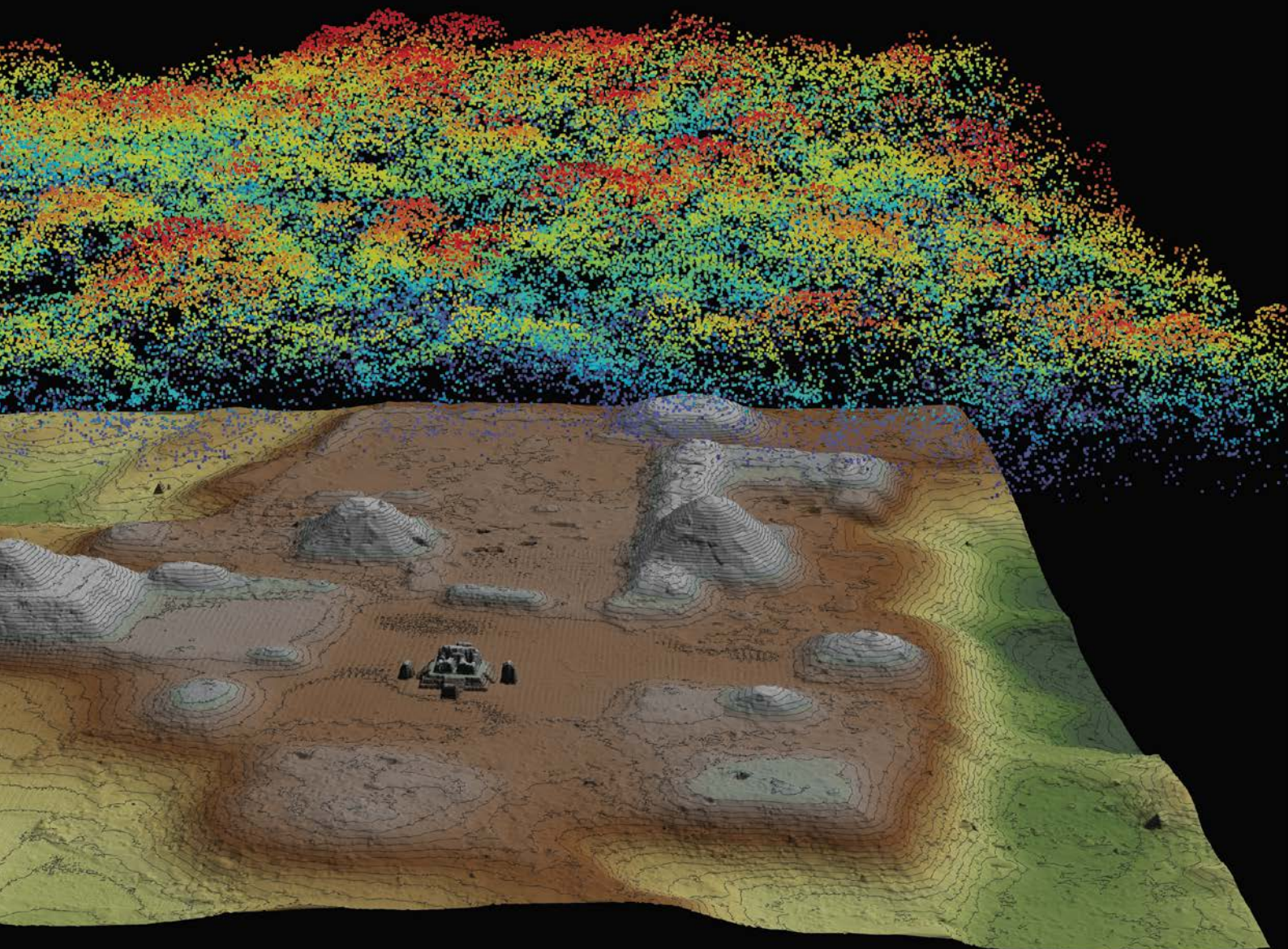
Cette tâche est d'autant plus concevable que, pour aménager leurs cités et leurs environnements, les civilisations précolombiennes pratiquaient à grande échelle le terrassement. De fait, aujourd'hui, de nombreux Américains vivent non loin de vestiges de cités, de cimetières et de décharges précolombiens, mais les prennent souvent pour de simples

>



JUAN CARLOS FERNÁNDEZ DÍAZ
chercheur sénior au centre NCALM
de l'université de Houston

Le lidar est une forme de télédétection bien adaptée à la cartographie de sites archéologiques couverts par une végétation dense, comme le montre ce relevé d'une partie du site d'El Ceibal, dans le Petén, au Guatemala. Les fausses couleurs traduisent l'altitude de chaque point relevé (*partie supérieure de la figure*), de la plus basse (*bleu*) à la plus haute (*rouge*). La carte résultante (*en bas*) montre des structures anciennes d'une frappante variété.



> accidents de terrain... Cette confusion est moins probable s'agissant des grands tertres qui, de l'Amazonie au Canada, ont été édifiés par des cultures amérindiennes, par exemple pour porter des bâtiments de culte (parfois en pierre comme chez les Mayas) ou à usage funéraire. On connaît bien nombre d'entre eux, isolés ou groupés, tels le tumulus du Grand Serpent dans l'Ohio, Poverty Point en Louisiane, Spiro Mounds dans l'Oklahoma, Manitou Mounds au Canada et le complexe de tertres de la vallée de la rivière Upano au Guatemala, mais les vestiges de nombreux autres tertres sont peu décelables. En 1930, dans son ouvrage *The Mound-Builders*, l'archéologue américain Henry Clyde Shetrone estimait que plus de 100 000 tumulus artificiels sont éparpillés à travers 20 États des États-Unis.

DES ESTIMATIONS QUI VARIENT BEAUCOUP

Une telle ampleur suggère une population précolombienne considérable. Examinons le cas de Cahokia, une grande et ancienne cité du peuple des Mississippiens située près de Saint Louis, dans le Missouri, aux États-Unis. À son apogée, entre 1050 et 1150 (donc bien avant l'arrivée des Européens), cette agglomération constituait sans doute un centre d'activité et de commerce comparable aux grandes cités européennes du Moyen Âge. Les archéologues y ont découvert plus de 120 tumulus de tailles diverses. L'un d'entre eux, le tumulus du Moine (Monk's Mound), un empilement de quatre terrasses, constitue la plus grande pyramide connue aux États-Unis. Haut de 30 mètres pour 300 mètres de long et 200 mètres de large, ce vaste terrassement met en jeu plus de 600 000 mètres cubes de terre... Tout cela suggère que la population de Cahokia devait être considérable, mais les estimations varient, allant de 6 000 à plus de 40 000 habitants à son apogée.

Un autre cas illustre la plausibilité d'une très forte population précolombienne : les efforts colossaux accomplis par les Mayas vivant dans les terres marécageuses de certaines régions du Yucatán afin de pouvoir y cultiver du maïs, des courges et des avocats. La façon dont ces habitants ont aménagé des paysages marécageux entiers en dit long sur leurs compétences en ingénierie hydraulique et sur le haut niveau d'organisation de la société maya. Et l'échelle à laquelle ils ont réalisé ces aménagements suffisait à nourrir des dizaines de milliers de personnes vivant dans un rayon de plusieurs centaines de kilomètres. Cette constatation implique l'existence de réseaux d'échange complexes et des moyens de transport correspondants.

Pour autant, sans indices certains sur les effectifs des Mississippiens ou sur l'importance

de la population maya, comment savoir ? Les archéologues tentent de répondre à cette question par deux approches, qui souffrent toutes deux du manque de données disponibles.

La première consiste à remonter le temps : après avoir établi l'état le plus ancien de la population pouvant être reconstitué à partir des recensements incomplets et des témoignages informels disponibles, on tente de calculer les effectifs qui se sont succédé dans le passé en faisant des hypothèses raisonnables sur les taux de naissance et de mortalité à chaque génération.

La population du centre du Mexique serait passée de 25 millions d'habitants à seulement 700 000 à l'ère coloniale

La seconde approche se fonde sur les données archéologiques disponibles : elle consiste à répertorier les hameaux, les villages, les villes, les cités et tous les aménagements présents dans un territoire, puis à leur attribuer des nombres plausibles d'habitants.

Ces deux approches n'ont pas permis aux archéologues de s'entendre sur une estimation des populations précolombiennes. Tout d'abord, les restitutions démographiques fondées sur une remontée du temps sur la base de l'état démographique plusieurs siècles après l'arrivée des Européens n'ont rien de fiable : des différences de quelques points de pourcentage seulement dans l'estimation des taux de mortalité conduisent à des différences de plusieurs dizaines de millions d'habitants dans les résultats...

Ensuite, les bactéries et les virus européens ont infligé de terribles épidémies aux populations du Nouveau Monde, ce qui complique les comptages démographiques. Ainsi, selon les archives historiques, la population du Mexique central serait passée de 25 millions d'habitants à seulement 700 000 au cours du premier siècle de l'ère coloniale... L'importance de cet effondrement est toutefois mise en cause par certains archéologues pour qui l'idée que 25 millions de Mayas auraient habité le Mexique central vers 1500

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 >

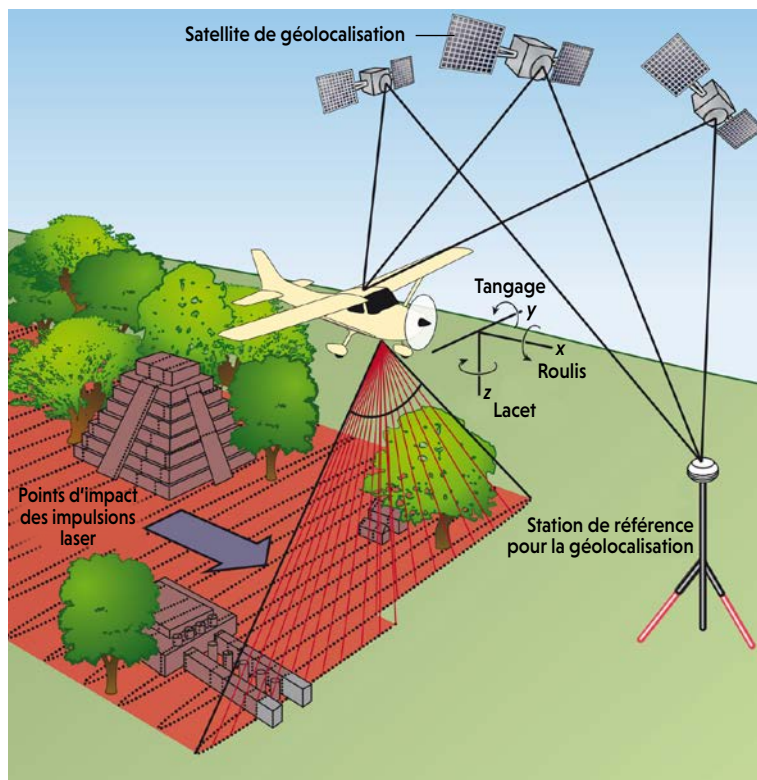
LE PRINCIPE DU LIDAR AÉROPORTÉ

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.

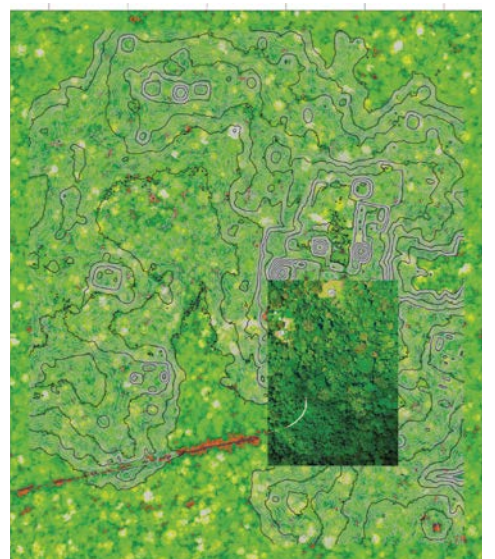
En 2013, le relevé initial a été augmenté de 1 057 kilomètres carrés supplémentaires. Arlen et Diane Chase, qui travaillent aujourd'hui à l'université du Nevada, dirigeaient alors l'équipe des archéologues. Selon eux, le lidar aéroporté a transformé l'archéologie de la région maya. De fait, les données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

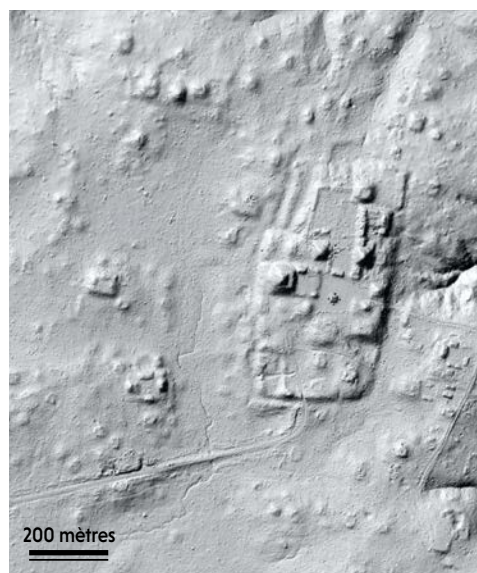




Les fouilles du site d'El Ceibal (*ci-dessus*) ont révélé que cette cité fondée il y a quelque 1 500 ans a été occupée pendant une longue période. Agglomération maya majeure, elle comprenait des milliers de bâtiments allant de grandes pyramides à de modestes maisons ; à l'apogée de la ville, on estime 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



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 place 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



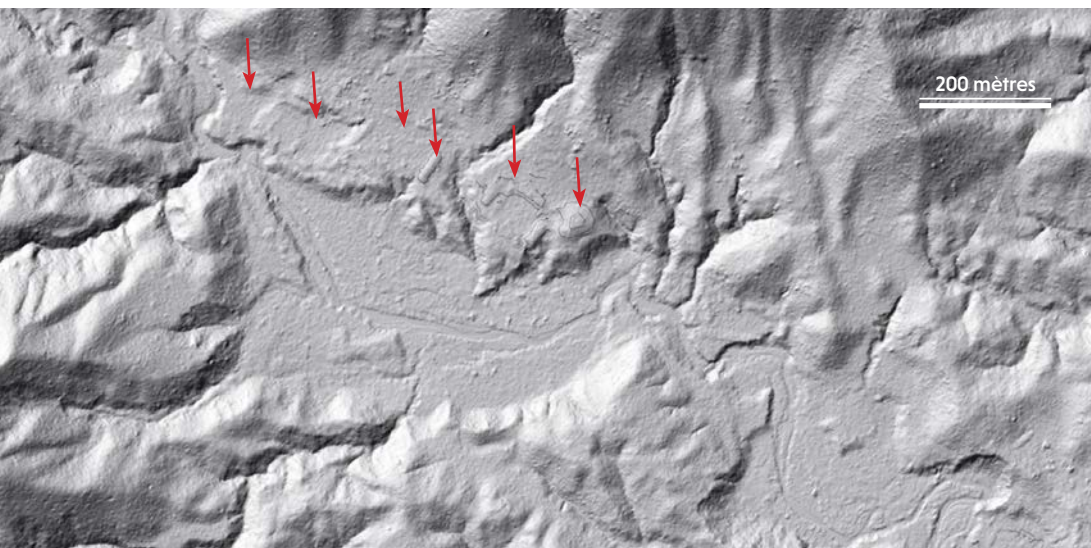
agglomération particulière ou une autre correspond à la légendaire *Ciudad Blanca*, mais les données lidar montrent que ces habitats sur monticules de terre étaient répandus dans toute la région de la Mosquitia. Comme les terrassements réalisés ont dû exiger beaucoup d'organisation et de main-d'œuvre 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.

Rouge...

Des champs de neige rouge dans
les montagnes, des averses pourpres,
des traces sanglantes de pas sur
un tapis neigeux immaculé...
Au ^{xix}^e siècle, les savants multipliaient
les hypothèses et les études
pour comprendre cet étrange
phénomène, élucidé il y a peu.

«**L**ycosthenes raconte, qu'en Saxe il pleut des poissons en grand nombre: et que du temps de Loys empereur, il pleut trois jours et trois nuits durant, du sang: et que l'an 989, il tomba vers la ville de Venise, neige rouge comme sang», relate Ambroise Paré en 1579 dans l'*Appendice au livre des monstres*. De la neige rouge comme du sang? Les preuves de ce phénomène singulier affluent de toutes parts. Parfois, une fine couche de neige blanche la recouvre et, lorsque le voyageur la foule, il laisse des traces sanglantes sur son passage. Ce phénomène effrayant accentue la crainte que provoquent les montagnes. Traverser un tel champ, est-ce une punition de Dieu? Est-on alors maudit par des esprits maléfiques ou des mauvais génies?

Durant plusieurs siècles, les voyageurs redoutent ainsi de rencontrer cette terrible neige rouge. De premières explications >

