

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 Bacteriovoracaceae, 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 Bacteriovoracaceae 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.

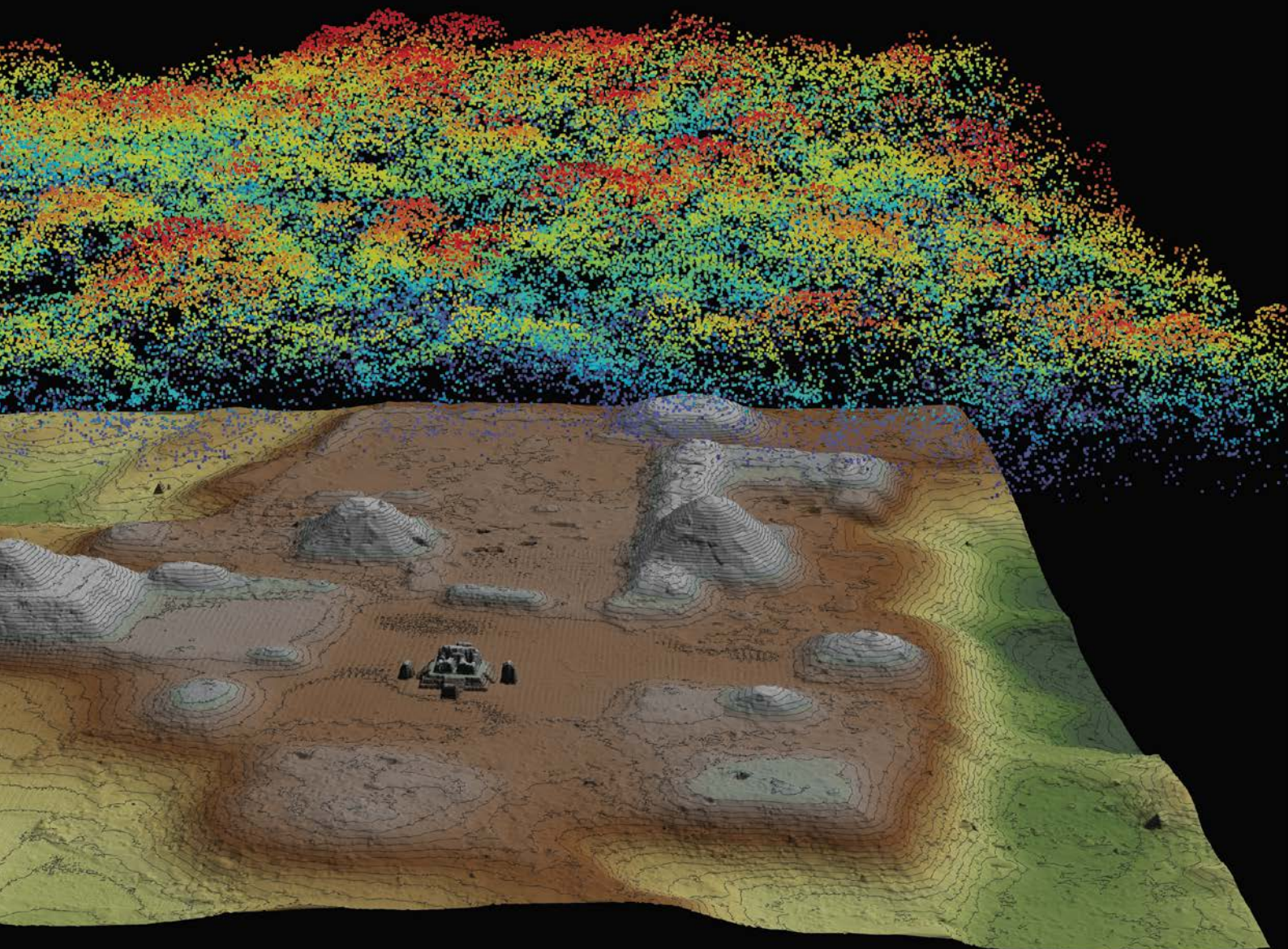
Cette tâche est d'autant plus concevable que, pour aménager leurs cités et leurs environnements, les civilisations précolombiennes pratiquaient à grande échelle le terrassement. De fait, aujourd'hui, de nombreux Américains vivent non loin de vestiges de cités, de cimetières et de décharges précolombiens,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