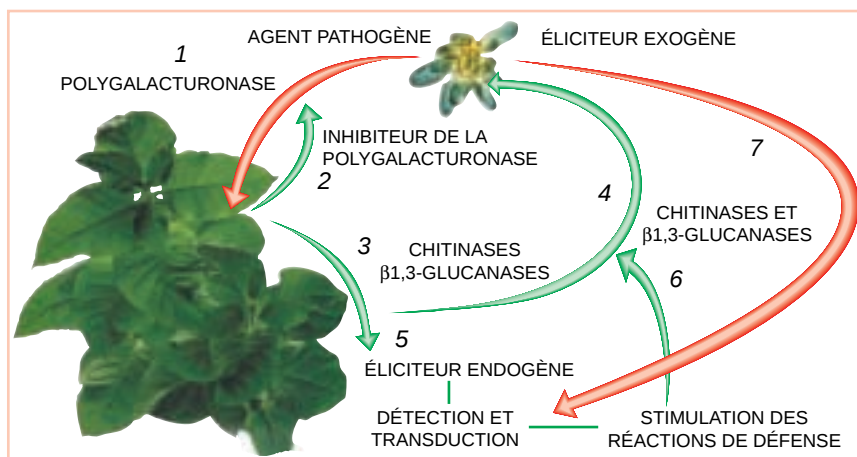


Il s'agit d'oligosaccharides produits par des enzymes d'origine microbienne et d'origine végétale. Ainsi, certains champignons produisent des polygalacturonases qui dégradent rapidement la paroi végétale. La plante riposte contre ces facteurs d'agressivité en synthétisant des inhibiteurs de polygalacturonases qui freinent la dégradation de la paroi végétale et, par conséquent, freinent la progression de l'agent pathogène. Comme ces inhibiteurs n'inactivent pas totalement la polygalacturonase, la paroi végétale continue à être partiellement dégradée ; des fragments oligosaccharidiques ayant une activité d'éléciteurs sont alors libérés de la paroi et activent les réactions de défense. La paroi végétale est à la fois un rempart mécanique et un réservoir de signaux d'activation des réactions de défense.

Un système d'amplification

De surcroît, la plante utilise également la paroi des cellules de champignons agresseurs comme une source d'oligosaccharides qui déclenchent les réactions de défense. Ce sont certaines enzymes de la plante, telles les β -1,3-glucanases ou les chitinases, qui permettent la libération de nouveaux signaux qui, eux-mêmes, déclenchent la synthèse de nouvelles β -1,3-glucanases et chitinases végétales : le système de défense de la plante est ainsi amplifié. Parfois, l'agent pathogène riposte en produisant un inhibiteur de ces enzymes végétales.

Le système de défense des plantes vis-à-vis d'agents pathogènes très variés comporte donc différentes stratégies complémentaires, simultanées ou différées, localisées ou globales. Les mécanismes sous-jacents sont coordonnés dans l'espace (dans la plante) et dans le temps : certaines réactions se déclenchent en quelques secondes ou en quelques minutes sur le site d'infection, d'autres, éloignées apparaissent après plusieurs heures. Certaines cessent avec l'emprisonnement, parfois la mort, du parasite, d'autres persistent plusieurs semaines, notamment celles qui assurent un état de veille préparant la plante entière à être encore plus performante lors d'une nouvelle agression. Les modalités de la contre-attaque de la plante mettent en jeu un arsenal d'armes diverses qui visent plusieurs cibles de l'agent pathogène, augmentant d'autant l'efficacité de la défense.



5. DES MÉCANISMES D'AMPLIFICATION renforcent les défenses des plantes. L'agent pathogène produit l'enzyme polygalacturonase (1) qui dégrade la paroi de la plante, laquelle synthétise un inhibiteur de l'enzyme (2). Dès l'attaque, elle libère aussi les enzymes chitinases et β 1,3-glucanases (3) qui attaquent la paroi des cellules de l'agent pathogène (4). L'inhibiteur de la polygalacturonase n'empêche pas totalement l'enzyme d'agir : la paroi végétale est un peu dégradée et libère des éléciteurs endogènes (5) ; ces derniers activent les réactions de défense, notamment la synthèse de nouvelles enzymes chitinases et β 1,3-glucanases (6), lesquelles renforcent l'action des premières. Ces enzymes, agissant sur la paroi des cellules de l'agent pathogène libèrent des éléciteurs exogènes qui stimulent aussi les réactions de défense de la plante (7).

Aujourd'hui, nous connaissons des signaux capables de déclencher, hors de toute infection, une partie, voire la totalité, de ces réactions de défense. Ainsi, avec la Société Goëmar, à Saint-Malo, et la Société Biotransfer, à Montreuil, nous avons montré que des extraits d'algues, nommés laminarines et contenant des glucanes, sont de puissants éléciteurs de réactions de défense qui ne déclenchent pas de mort cellulaire. Ils protègent efficacement des plantes d'intérêt agronomique telles que le blé, l'orge, le riz, la vigne ou les pommiers contre différentes maladies. Une telle démarche, fondée sur la stimulation des défenses des plantes à l'aide de composés naturels non toxiques, concilie agriculture performante et respect de l'environnement. On envisage d'étendre ce type d'actions protectrices ; en utilisant de tels

produits naturels en synergie avec les pesticides chimiques, on pourrait diminuer les volumes des pesticides et des fongicides. Cette démarche pourrait éviter la production de plantes transgéniques qui rencontre, pour l'instant, des oppositions par crainte d'une éventuelle dissémination non maîtrisée des gènes étrangers introduits dans ces plantes. Simultanément, avec la Société Rhône-Poulenc Agro, nous cherchons à élucider la nature des signaux émis par la plante lors de l'induction de la résistance locale acquise. Nous pourrions peut-être les utiliser pour stimuler cette réaction locale de défense, particulièrement efficace.

De ces recherches des mécanismes de défense des plantes naîtront sans doute des méthodes de protection des cultures plus efficaces et qui, surtout, respecteront mieux l'environnement.

Serge KAUFFMANN est directeur de recherche au CNRS, dans le laboratoire de Phytopathologie moléculaire à l'Institut de biologie moléculaire des plantes (IBMP) de Strasbourg, où Stéphane DOREY a préparé une thèse sur les mécanismes de la réaction hypersensible. Bernard FRITIG dirige le département Mécanismes moléculaires des réponses des végétaux aux agents pathogènes et aux xénobiotiques de l'Institut de biologie moléculaire des plantes.

Plant-Microbe Interactions, in *The Plant Cell*, numéro spécial, vol. 10, n° 10, 1996.

J. T. GREENBERG, *Programmed Cell Death in Plant-Pathogen Interactions*, in *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* vol. 48, pp. 525-545, 1997.

B. FRITIG et al., *Antimicrobial proteins in induced plant defense*, in *Curr. Opin. Immunol.*, vol. 10, pp. 16-22, 1998.

X. Dong, *Salicylic Acid, Jasmonic Acid, Ethylene, and Disease Resistance in Plants*, in *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 1, pp. 316-323, 1998.

Les villes des Mayas

WOLFGANG WURSTER

Au Nord du Guatemala, en pleine forêt tropicale, les archéologues étudient des villes qui étaient très peuplées à l'époque des conquistadores. Sous une pyramide, on a même trouvé une tombe princière qui échappa aux pillleurs.

En 1525, Hernán Cortés (1485-1547) et son armée atteignirent le cœur de la civilisation maya, dans la forêt tropicale du Petén, au Nord du Guatemala actuel. Dans ses lettres à l'empereur Charles Quint, Cortés décrit Tayasal, l'ancienne capitale construite sur une île, au milieu d'un lac. Celle-ci ne céda qu'en 1697 aux assauts des Espagnols, qui la rasèrent alors. À l'emplacement de cette ville insulaire des Itzas (l'un des groupes mayas originaires de la côte du Mexique qui s'étaient installés dans cette région vers les années 1200) se dresse aujourd'hui Flores, la capitale de la province du Petén (voir la figure 2).

Toutefois une autre agglomération insulaire, encore très peuplée au XV^e siècle et située à une cinquantaine de kilomètres à l'Est, échappa aux Espagnols : la ville de Topoxté, bâtie sur une île du lac Yaxhá. C'est seulement en 1831 que le gouverneur Juan Galindo découvrit ce lieu, déserté depuis le XVI^e siècle et complètement reconquis par la jungle.

Cette petite ville fut active longtemps après la fin de la période «classique», qui s'est étendue du IV^e au IX^e siècle de notre ère, alors que de nombreux centres mayas étaient abandonnés. En 1904, l'architecte Badois Teobert Maler (1842-1917), qui servit comme officier dans le corps expéditionnaire de l'empereur du Mexique Maximilien (1832-1867), en prit de nombreuses photographies pour le compte du Musée Peabody d'archéologie et d'ethnologie de Cambridge. Ces images montrent que les pyramides étaient encore assez bien conservées (voir la figure 3) ; elles sont des documents irremplaçables, car l'état de ces monuments s'est considérablement dégradé depuis cette époque.

Des missions archéologiques américaines fouillèrent quelques monu-

ments, mais aucune fouille d'ensemble ne fut malheureusement réalisée. Grâce à une aide financière et technique considérable fournie par l'Allemagne, on a sauvé *in extremis* les monuments subsistants d'une ville maya de la période tardive. Le sauvetage et les fouilles systématiques de cette ville ne représentent cependant que la première étape d'un très ambitieux projet de développement du Petén central, mené par l'Allemagne et le Guatemala : on veut sensibiliser les populations locales à la valeur de ces monuments et leur permettre d'en faire un outil de développement régional qui préserverait le milieu. Du point de vue archéologique, l'objectif est d'explorer comment les Mayas, à cette période tardive de leur développement, avant qu'ils n'aient été perturbés par les Européens, s'y prenaient pour nourrir une population qu'on évalue à environ deux millions de personnes dans un environnement très difficile à exploiter : au milieu de la forêt tropicale, marécageuse, un kilomètre carré assurait la subsistance de quelque 200 personnes (cette valeur est proche de celles des pays industrialisés modernes).

Topoxté, une forteresse flottante

On ignore généralement que certaines régions sont restées peuplées après la fin de la période classique. Dans ces régions, une transition vers la haute culture maya avait eu lieu plusieurs siècles avant la transition généralement admise : étaient déjà présents les mystérieux systèmes d'écriture et de calendrier, le système de construction des voûtes jusque-là inconnu en Amérique centrale, et les temples impressionnants érigés sur d'imposantes pyramides, qui marquaient le centre vital d'agglomérations urbaines

parfois gigantesques. Beaucoup de ces centres urbains et, notamment, la métropole Tikal semblent s'être considérablement dépeuplés vers les années 900 de notre ère ; d'autres ne furent plus habités que par des agriculteurs. Toutefois la forêt du Petén resta exploitée, et les populations bâtirent des villes fortifiées sur les îles des nombreux lacs présents dans cette région karstique. La plupart de ces villes n'existent plus qu'à l'état de ruines, et seule Topoxté, avec ses principaux monuments encore dressés, donne une idée de l'urbanisme de la période tardive.

Le sauvetage de cette forteresse lacustre fut très difficile, en particulier à cause des pluies : l'humidité et la végétation avaient dégradé les murs de pierre, à joints de chaux, et les tunnels creusés par les pillleurs de tombes avaient fragilisé les constructions.

Même les fouilles archéologiques antérieures avaient souvent endommagé les monuments : comme dans de nombreux sites d'Amérique centrale, la recherche des tombes enterrées avait été insuffisamment délicate, et les chantiers n'avaient même pas été refermés. En 1990, la pyramide principale de Topoxté était largement effondrée, et les murs du temple érigé à son sommet menaçaient de s'effondrer.

L'Institut guatémaltèque d'anthropologie et d'histoire consolida hâtivement les édifices menacés d'effondrement : il posa des toits en feuilles de palmier pour protéger les ruines des pluies torrentielles et

1. TEL UN PHARE BLANC, le temple élevé sur la pyramide principale de Yaxhá émerge de la forêt tropicale. Cet ensemble, qui date de la fin de la période classique de la culture maya, risquait de s'effondrer. Il a été restauré par des équipes allemandes et guatémaltèques, qui explorent simultanément de nombreux campements mayas, dans la jungle du Petén.



ceintura les murs par des échafaudages en bois maintenus par des lianes. C'est alors que des collaborations avec la Commission pour l'archéologie générale et comparée (KAVA) de l'Institut allemand d'archéologie conduisirent à l'idée d'une fouille systématique des ruines mayas du Petén central et d'une restauration des bâtiments en vue d'une conservation durable.

Topoxté semblait un bon point de départ pour ce programme, car on y trouve les derniers grands monuments de l'époque postclassique dans l'intérieur des terres, et les dimensions réduites de cette île (400 mètres par 500) permettent d'avoir une vue d'ensemble du champ de fouilles.

Nous nous sommes fixé trois objectifs principaux : dresser un plan d'ensemble du complexe urbain, identifiant notamment tous les bâtiments qui avaient échappé aux précédentes campagnes de fouilles parce qu'ils étaient cachés par la végétation ; identifier

les niveaux d'occupation successifs ; préserver les vestiges des monuments et éviter la poursuite de leur dégradation. Aujourd'hui les deux premiers objectifs de ce programme sont quasi atteints, et la préservation de Topoxté semble en bonne voie.

Pour effectuer les relevés topographiques et recenser les bâtiments, les équipes durent commencer par éclaircir la végétation au prix d'un travail pénible. Ce travail a été récompensé : nous connaissons aujourd'hui tous les bâtiments de cette ville qui resta très peuplée jusqu'au XV^e siècle (voir la figure 6). Le sommet du site était occupé par des temples pyramidaux qui entouraient une place allongée. Sur cette place, les Mayas avaient dressé des autels et des stèles en pierre sur lesquelles ils consignaient des événements importants. À proximité du centre de culte se trouvaient les quartiers occupés par l'élite, ainsi que des salles de réunion couvertes (on a retrouvé des piliers maçonnés). À partir de ce centre,

la ville descendait, par terrasses successives jusqu'aux rives abruptes de l'île. Avec ses décorations de stuc et ses crépis de chaux, Topoxté devait être une forteresse blanche dressée au-dessus de la forêt qui se reflétait dans les eaux du lac.

Des fouilles profondes ont donné quelques indications sur l'histoire ancienne de la ville. Les études ont



2. UNE ZONE TRIANGULAIRE, dans la région du Petén, est aujourd'hui classée, à côté de la réserve archéologique de Tikal. Ce « triangle culturel » comprend les anciennes villes mayas de Yaxhá, de Nakúm et de Naranjo. La région du Petén, aujourd'hui enfouie sous la végétation tro-

pical, était le centre de la culture maya. Le classement de zones de forêts (encadrées sur la carte) a pour objectif de stopper la colonisation anarchique des forêts à peine explorées (en vert) qui se trouvent au Nord de la route entre Melchor de Mencos et Flores.

été facilitées par l'heureuse habitude qu'avaient les Mayas d'ériger de nouveaux monuments et bâtiments de culte au-dessus des précédents, sans détruire ces derniers. C'est ainsi que s'érigèrent des pyramides de plus en plus hautes, structurées comme des poupées russes. De même, les places furent progressivement surélevées par l'adjonction de nouvelles couches.

Ces recherches ont montré que la ville fut un centre de culte pendant les 2 000 ans qu'a duré son occupation. On a notamment daté du III^e siècle avant notre ère les marches des temples les plus anciens, grâce aux céramiques qui leur étaient associées. Mieux encore, on a découvert un complexe de cryptes sacrées, creusées dans le calcaire tendre du sous-sol et datant de la période ancienne (voir la figure 7). Ce complexe semble être à l'origine des monuments pyramidaux qui furent ultérieurement construits au-dessus de lui. Les nombreuses offrandes retrouvées dans ces cryptes – essentiellement des récipients en céramique – renseignent sur le début du culte des morts.

Aujourd'hui les premières mesures de conservation sont prises ; les équipes ont plus de temps pour affiner le travail. Les ruines les plus atteintes ont été consolidées, les murs d'enceinte ont été renforcés, on a comblé les trous creusés par les pillards de tombes et consolidé avec du mortier à la chaux les couronnements des murs lessivés par la pluie. Toutefois l'équipe de conservation s'est gardée de reconstituer des bâtiments perdus, cherchant d'abord à maintenir les ruines dans l'état actuel.

Alors que l'on finissait de fouiller l'île de Topoxté, nous avons fait une découverte inattendue : sous une pyramide, nous avons trouvé une chambre mortuaire complètement intacte. L'accès à cette pièce, par des passages souterrains difficiles à trouver, avait évité le pillage de la tombe, dont le mobilier funéraire était intact. Le cercueil, rectangulaire, avait été creusé dans le calcaire. Il était recouvert d'un couvercle constitué de poutres de bois ; son fond et ses parois étaient enduits d'une couche de stuc. La chambre contenait une banquette maçonnée et des niches.

La tombe contenait le squelette d'un homme, sous une couche de cinabre. Les riches enduits indiquent que la tombe fut réalisée à la fin de l'époque classique de la culture maya, vers le milieu du VIII^e siècle de notre ère. Les

dents du mort étaient incrustées de jade. Le fond de la tombe, autour du squelette, était tapissé d'une mosaïque de jade, de coquilles et de perles. L'ensemble représentait des scènes animales mythologiques.

De très beaux récipients, des coupes colorées et des assiettes étaient déposés dans la chambre funéraire. Le prince mort était enseveli avec des atours ornés de coquilles de crustacés et d'escargots, et de jade. Au total, quelque 260 pièces de jade constituaient sa couronne, son pectoral et ses chaînes. La



Teobert Maler, Wolfgang W. Wurster/KAVA

3. LES MONUMENTS DE TOPOXTÉ étaient encore relativement bien conservés en 1904 : cette photographie prise par l'architecte allemand Teobert Maler représente la face Sud-Ouest de la grande pyramide. Le mur externe de la pyramide, ainsi que les murs du temple, étaient encore debout à l'époque. Une grande partie du seul temple maya postclassique encore conservé dans la région du Petén s'est malheureusement effondrée en 1990 (schéma).

découverte d'un miroir rituel rond était inattendue, ainsi que celle un plateau de schiste, avec une inscription circulaire de hiéroglyphes, qui indiquait probablement le nom du mort. De tels miroirs rituels, très coûteux, étaient l'apanage des prêtres ; le miroir avait d'ailleurs été placé sur la poitrine, comme ornement.

Sous le mobilier funéraire, on a également trouvé un os humain taillé ; il porte le signe de la ville maya de Tikal, ce qui prouve que l'élite de Topoxté était liée à celle de Tikal.

La chambre funéraire de l'île de Topoxté n'est pas seulement remarquable par la beauté des céramiques peintes ou par le travail des objets de jade ; elle est bien plus intéressante par les informations qu'elle donne sur la fin de la période classique dans la culture maya du Petén central.

Protection et développement

Nous l'avons vu, le projet Topoxté place la restauration du site archéologique au centre d'un vaste programme de développement de la province du Petén. Cette immense région à peine explorée fait face à des problèmes quasi insolubles. Tout d'abord, la culture sur brûlis détruit chaque année quelque 60 000 hectares de forêt tropicale. Toutefois cette pratique n'est que la conséquence d'un accroissement démographique excessif et d'une occupation anarchique des sols. La dégradation de l'environnement, l'extension de la culture du pavot et la guerre civile aggravent les difficultés.

Le développement de la région ne peut être durable que si l'on exploite rationnellement la forêt tropicale et si l'on conserve les ruines les plus importantes de la culture maya, après les avoir restaurées. L'Allemagne a alloué plusieurs millions de francs à l'aide au développement, mandatant l'Institut de crédit pour la reconstruction et le KAVA pour la gestion de ces fonds. Le projet établi en collaboration avec le Guatemala, nommé *Triangulo Cultural* (le Triangle culturel), couvre une zone de jungle

d'environ 1 200 kilomètres carrés. Y figurent les ruines de trois villes importantes dont l'âge d'or se situe à la fin de la période classique (Yaxhá, Nakúm et Naranjo), ainsi que les vestiges de nombreux autres petits peuplements mayas qui, pour la plupart, n'ont pas encore été fouillés. Le gouvernement guatémaltèque a classé la région zone archéologique et parc naturel (voir la figure 2). Elle jouxte une zone déjà classée, de 24 kilomètres de côté, où l'on avait découvert les ruines de la ville de Tikal. L'ensemble des zones protégées doit bloquer l'avancée des brûlis sauvages, qui remontent du Sud, et protéger la forêt tropicale encore intacte, au Nord.



4. DANS UNE TOMBE, sous une pyramide de Topoxté, on a retrouvé le corps d'un prince et de nombreux ornements parmi lesquels cette céramique de 33 centimètres de diamètre et cet ornement de jade travaillé, de neuf centimètres de large.

Les travaux sur le terrain ont commencé en 1994. Il fallut d'abord expédier beaucoup de matériel (véhicules tout terrain, échafaudages, etc.) dans la zone d'études, quasi dépourvue d'infrastructure. Puis les équipes durent dresser un camp archéologique comportant des parties d'hébergement et des ateliers, avant d'assembler les échafaudages en acier qui permettaient de travailler sans danger. Les études ont commencé rapidement avec les relevés topographiques de Yaxhá, une ville qui s'élevait au-dessus du lac du même nom, sur une bonne partie de sa rive Nord. La pyramide principale de Yaxhá, qui s'élève au point le plus élevé de la ville, menaçait de s'effondrer : elle dut être consolidée (voir les figures 1 et 5). À partir d'échafaudages dressés autour du bâtiment, les murs furent d'abord stabilisés par des entretoises métalliques ; les (fausses) voûtes – qui constituent une spécificité de la culture maya – furent renforcées au mortier de chaux, et les murs nettoyés et rejointoyés.

Des sondages effectués dans le plancher du temple le plus récent (il date de la fin de l'époque classique) révélèrent qu'il était construit au-dessus d'un autre bâtiment extrêmement bien conservé. En outre, on découvrit un dépôt d'offrandes intactes, constituées de magnifiques poteries et de figurines portant une mosaïque de jade et de coquillages. Le dernier temple réservait des surprises : dans les murs crépis, des dessins gravés représentent des scènes de la vie maya.

D'autre part, l'ancienne petite résidence royale de Nakúm impressionne par ses palais érigés au sommet d'imposantes plates-formes artificielles superposées. Là, le chantier est en cours ; on recense les bâtiments, on dresse progressivement la carte du site et l'on prévoit des sondages afin de dater les différentes constructions.

Les travaux de conservation des monuments de Nakúm sont très onéreux : on a dû, par exemple, ceinturer la grande pyramide sur l'ensemble de