

Max-Planck de biogéochimie de Iéna, en Allemagne, et d'autres collègues, nous avons utilisé les sédiments échantillonnés au Grand Canyon et d'autres pour extraire des fossiles moléculaires nommés biomarqueurs.

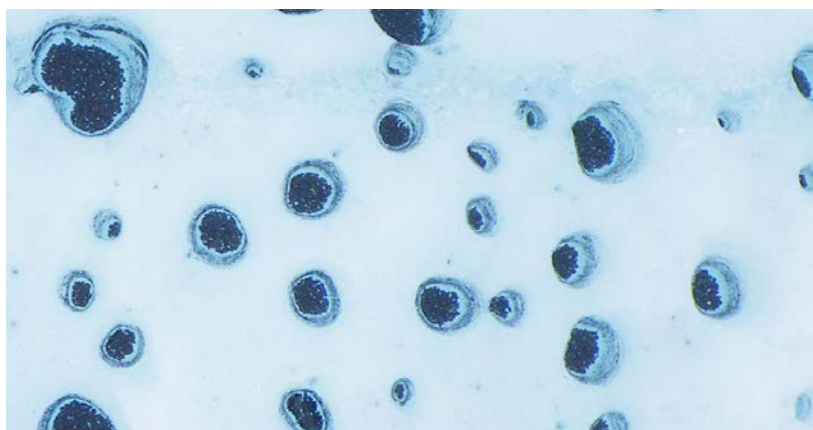
Cette technique repose sur le fait que différentes espèces synthétisent des molécules organiques qui leur sont propres et qui peuvent être préservées dans les sédiments pendant plusieurs millions d'années. Les molécules organiques extraites des divers sédiments ont permis de montrer que différents groupes d'algues existaient avant, pendant et après le Cryogénien. La technique a aussi révélé que la capacité des organismes à produire une molécule particulière, le 24-éthyl-stérol, est apparue durant cette période. Cette molécule est importante, car elle rend la membrane cellulaire plus résistante aux variations de température. Cette innovation biologique aurait donné aux algues vertes un avantage considérable, leur permettant de proliférer et de coloniser la surface de la planète.

En effet, la même année, dans une étude complémentaire fondée cette fois sur l'exploration de la diversité d'un groupe de lipides – les stéroïdes – dans les sédiments cryogénien, Jochen Brocks, de l'université nationale d'Australie, Yosuke Hoshino et leurs collègues ont montré que juste avant le Cryogénien, le monde était dominé par des producteurs de stéroïdes primaires de type cyanobactéries, puis que les algues marines planctoniques les avaient « vite » supplantés durant l'interlude entre les deux glaciations. La pression de sélection que ces glaciations ont imposée au monde vivant se révèle ainsi avoir été un véritable stimulus évolutif qui a mené à l'émergence de la famille des algues vertes.

COUP DE POUCE DE BACTÉRIES

Un autre stimulus a pu jouer un grand rôle dans l'émergence de la vie pluricellulaire: une oxygénation massive de l'atmosphère, qui lui aurait permis d'atteindre une concentration proche de l'actuelle. Ce sont cette fois des échantillons de la fin de la glaciation marinoenne prélevés en 2010 au Mato Grosso, au Brésil, qui nous ont permis, en 2016, d'apporter cette seconde brique dans l'histoire de la vie. Nous avons mis en évidence le rôle de bactéries exploitant le soufre dans cette oxygénation massive.

L'oxygénation de l'atmosphère s'est déroulée sur deux périodes: la première, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, est attribuée (en partie) à la photosynthèse. La seconde, comprise entre 1 milliard et 540 millions d'années, restait inexpiquée. En analysant les composés soufrés dans les sédiments, nous nous sommes aperçus qu'ils étaient très abondants, ce qui suggérait une activité intense de bactéries qui utilisent ces composés comme oxydant dans une respiration anaérobie (sans oxygène). Nous avons estimé que ces bactéries auraient été responsables d'une



Des cryoconites, des trous de quelques dizaines de centimètres que l'on observe dans la banquise arctique et antarctique, comme ici au Groenland, ont pu héberger la vie durant les glaciations du Cryogénien.

baisse de 50% des sulfates dissous dans l'océan. Ces bactéries auraient ainsi « épargné » l'oxygène produit par les organismes photosynthétiques. Ce mécanisme, couplé à l'essor des algues, aurait permis d'accumuler une quantité suffisante d'oxygène libre pour soutenir énergétiquement des formes de vie multicellulaires.

Bon nombre de mystères restent à résoudre concernant ces épisodes de Terre boule de neige. Notamment, peu de modèles numériques expliquent une sortie de glaciation sans invoquer une accumulation extrême de CO₂ dans l'atmosphère, en désaccord avec les données géochimiques obtenues. Certains chercheurs s'orientent donc vers d'autres explications, comme la libération du méthane piégé sous la glace des continents lors de ses fracturations.

Notre équipe poursuit sa quête d'échantillons. Nous revenons récemment de Suède où des sédiments cryogénien très bien préservés affleurent. Nous espérons y identifier la biomasse produite durant la glaciation et comparer son signal chimique à celui des cryoconites antarctiques actuelles, mais aussi estimer l'impact de la colonisation post-Terre boule de neige sur le cycle global du carbone.

On nous demande souvent si la Terre subira une autre glaciation globale. La conjonction des facteurs qui l'ont permise au Néoprotérozoïque était assez exceptionnelle: des continents tous en position tropicale, ce qui favorisait leur altération, et donc le piégeage du CO₂. Aujourd'hui, ces conditions ne sont pas réunies, mais même réunies, elles ne permettraient sans doute plus l'entrée en glaciation. En effet, le Soleil est plus vieux de 700 millions d'années et sa puissance a augmenté. La principale conséquence est qu'il faudrait une concentration quasi nulle en CO₂ dans l'atmosphère pour que la Terre se couvre de nouveau de glace. Plus le Soleil vieillira, plus il sera donc difficile d'enclencher le processus. On note toutefois que dans les années 1960, les travaux de Mikhaïl Budyko se fondaient sur un scénario anthropique, celui d'un hiver nucléaire lié à un affrontement ouvert entre les blocs de l'Est et de l'Ouest. Ce scénario reste d'actualité... ■

BIBLIOGRAPHIE

P. F. Hoffman *et al.*, **Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology**, *Science Advances*, vol. 3(11), e1600983, 2017.

Y. Hoshino *et al.*, **Cryogenian evolution of stigmastereoid biosynthesis**, *Science Advances*, vol. 3(9), e1700887, 2017.

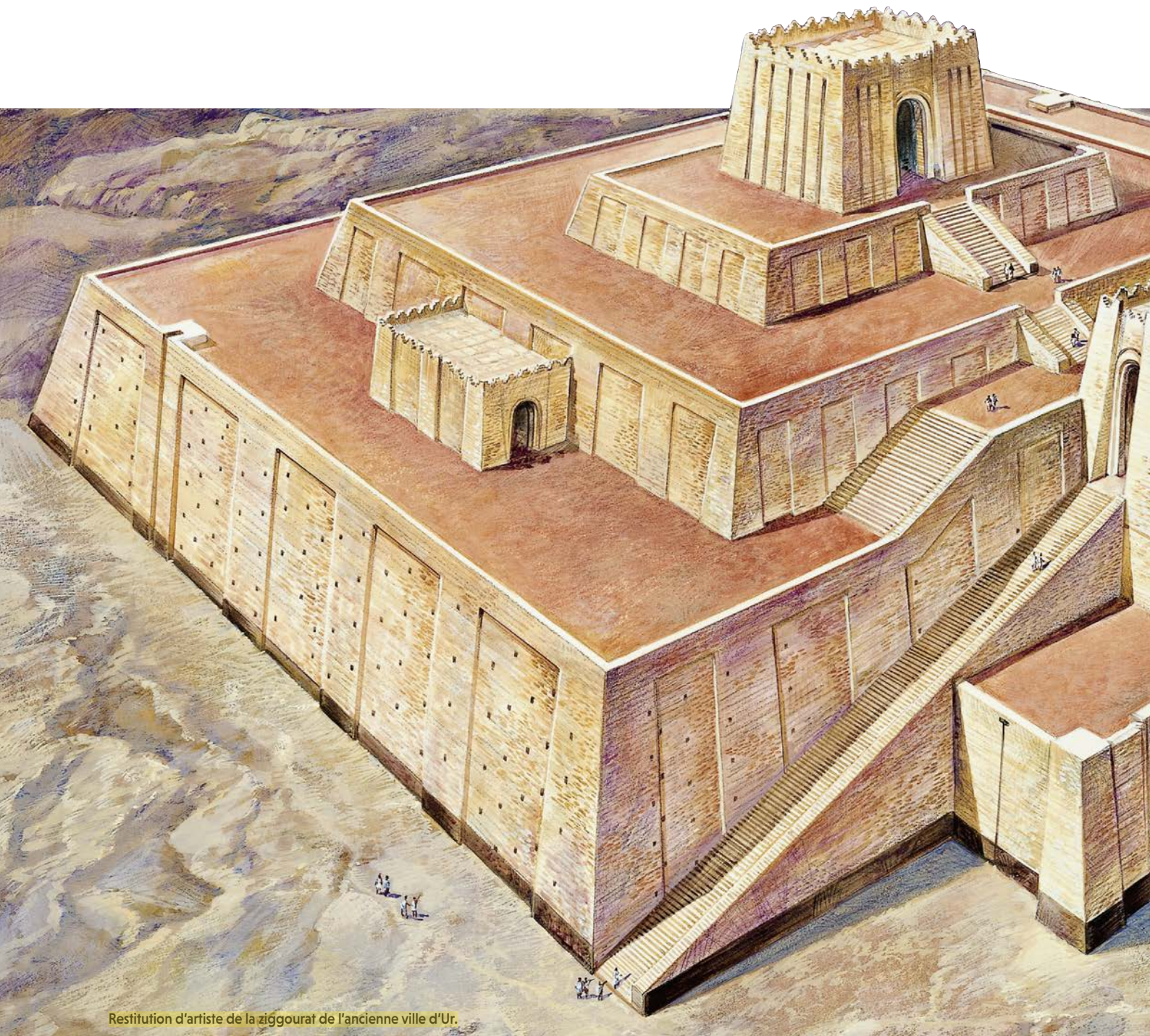
J. J. Brocks *et al.*, **The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals**, *Nature*, vol. 548, pp. 578-581, 2017.

P. F. Hoffman, **Cryoconite pans on Snowball Earth: Supraglacial oases for Cryogenian eukaryotes?**, *Geobiology*, vol. 14(6), pp. 531-542, 2016.

P. Sansjofre *et al.*, **Multiple sulfur isotope evidence for massive oceanic sulfate depletion in the aftermath of Snowball Earth**, *Nature Communications*, vol. 7, 12192, 2016.

P. Hoffman, **Quand la Terre était gelée**, *Pour la Science*, n° 268, pp. 30-37, fév. 2000.

Combien a coûté la tour de Babel?



Restitution d'artiste de la ziggourat de l'ancienne ville d'Ur.

L'ESSENTIEL

> Pour gagner en prestige, les rois mésopotamiens érigeaient des ziggourats, des pyramides en gradins surmontées d'un temple.

> Les ouvriers participant à la construction étaient rémunérés suivant un système qui ramenait tout à des quantités d'orge.

> Des informations sur la construction des ziggourats ont été trouvées dans les textes cunéiformes inscrits sur des tablettes d'argile.

> Les auteurs s'en sont servis pour estimer les coûts de construction de ces imposants bâtiments.

LES AUTEURS



HAGAN BRUNKE
mathématicien
et assyriologue
à l'université
libre de Berlin



**EVA CANKIK-
KIRSCHBAUM**
assyriologue
à l'université
libre de Berlin



© DEA Picture Library/De Agostini/Getty Images

La ziggourat de Babylone, une grande pyramide à terrasses surmontée d'un temple, a inspiré le mythe de la tour de Babel. Mais tous les rois de Mésopotamie ont construit ce type de monument. À quel coût ? La réponse est dans les textes cunéiformes.

Les hommes voulurent faire de Babylone une ville grandiose grâce à une tour touchant le ciel. Dieu, rapporte la Bible, s'offusqua de cet orgueil humain et fit échouer le projet. Une décision divine dont Athanase Kircher, savant jésuite du XVII^e siècle, donna une sorte d'explication scientifique : la construction de la tour aurait épuisé les ressources de la Terre et son ombre l'aurait rendue en grande partie inhabitable. Cet échec babylonien aurait ainsi été une grande chance pour l'humanité. Mais toutes les cultures de l'Antiquité ne portaient pas sur la métropole de l'Euphrate un regard aussi négatif. Avec ses puissants remparts, ses ponts, ses portes, ses palais, ses sanctuaires, Babylone était vue par les Grecs comme une ville magnifique. Ses jardins suspendus ont même été considérés comme l'une des sept merveilles du monde, bien qu'il semble que les Anciens aient confondu à ce propos Babylone et Ninive (voir le blog de Cécile Michel, www.scilogs.fr/breves-mesopotamiennes/jardins-suspendus-babylone/).

BABYLONE ET SA ZIGGOURAT

Des populations humaines se sont sédentarisées depuis le V^e millénaire avant notre ère dans les plaines alluviales de l'Euphrate et du Tigre (d'où le nom grec de la région : *Mesopotamia*, le «pays d'entre les fleuves»). Elles ont fondé les premières cités, construit des systèmes d'irrigation et, vers 3300 avant notre ère, développé l'écriture cunéiforme afin de mieux gérer >

► l'économie de leurs cités-États. De ces débuts sont issues les premières grandes civilisations mésopotamiennes, à savoir les cultures sumériennes et akkadiennes, qui ont édifié d'importantes villes dotées d'importants bâtiments.

Toutefois, c'est la Babylone du roi Nabuchodonosor II (604-562 avant notre ère) qui s'est inscrite dans la postérité, car ce monarque fit rénover cette ville d'environ 900 hectares et l'équipa avec une ostentation démesurée. Il fit en particulier construire au centre de la ville une tour d'environ 90 mètres de haut constituée de sept terrasses empilées : une ziggourat, c'est-à-dire un édifice à degrés au sommet duquel trône un temple. Les Babyloniens la nommaient *Etemenanki*, c'est-à-dire « celle qui relie le ciel et la terre ». D'après les fouilles, sa base couvrait plus de 8100 mètres carrés, et elle a été construite avec environ 350000 mètres cubes de briques de terre crue séchées au soleil.

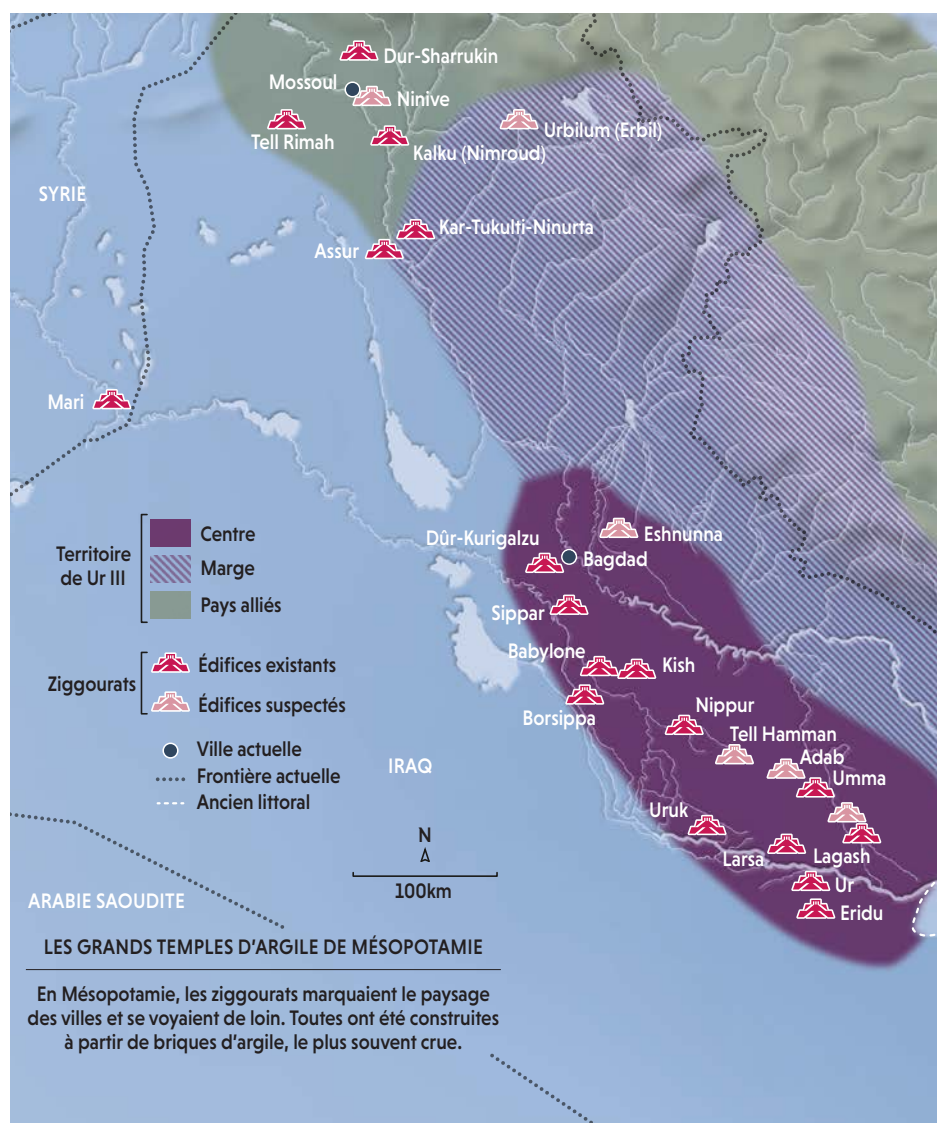
Si cette massive ziggourat était probablement la plus grande de Mésopotamie, elle n'était en aucun cas la seule. Depuis le III^e millénaire avant notre ère, d'importants édifices à terrasses empilées façonnaient le paysage de nombreuses villes mésopotamiennes (voir la carte ci-contre). Visibles de loin depuis les prairies fluviales et les steppes ouvertes de la Mésopotamie, ces sanctuaires manifestaient aussi le pouvoir des communautés urbaines.

Les fouilles et les descriptions des textes cunéiformes nous donnent une idée de l'aspect de ces monuments et de leurs usages. Elles nous apprennent aussi que leur érection relevait de la responsabilité de l'État et de son représentant, le roi. Celui-ci profitait toujours de la construction d'une ziggourat pour se mettre en avant et en scène en tant qu'architecte et maître d'ouvrage.

DES INVESTISSEMENTS CONSIDÉRABLES

Les textes contiennent beaucoup d'informations et de trésors encore inexploités. Nous les avons explorés afin d'étudier un aspect méconnu des monuments anciens : leurs coûts de construction. Comme ceux d'aujourd'hui, les grands projets de l'Antiquité nécessitaient des investissements considérables en matières premières et main-d'œuvre. Ainsi, une multitude d'ouvriers, d'artisans, d'architectes expérimentés et d'administrateurs y concouraient ; leur envergure signifiait des exigences élevées en termes de planification, de coordination et d'exécution de chaque étape de la construction. Et tout cela impliquait des risques.

Les maîtres d'ouvrage institutionnels actuels connaissent bien l'une des difficultés que rencontraient aussi leurs prédécesseurs mésopotamiens : la dérive des coûts. Celle-ci devient un problème grave lorsque la dépense



nécessaire consomme une part considérable des ressources de l'État. Afin d'échafauder un modèle de la structure des coûts d'une ziggourat – depuis l'érection de la colline artificielle en gradins portant le temple jusqu'à l'enduit des murs extérieurs de l'édifice –, nous avons commencé par analyser les documents administratifs du XXI^e siècle avant notre ère, époque de la III^e dynastie d'Ur (2112-2004 avant notre ère). Des dizaines de milliers de tablettes d'argile portant des inscriptions et provenant de différents secteurs de l'administration permettent, par exemple, d'établir le budget de la construction d'un palais et d'un temple. Les salaires des ouvriers bâtisseurs et le coût de leur nourriture en constituaient une part importante, car, même si la plupart de ces travailleurs n'étaient pas de statut social élevé, il ne s'agissait pas non plus d'esclaves.

Malgré la richesse de ces détails, les sources de cette époque ne disent pas tout. Quel était par exemple le coût de la production des