

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.

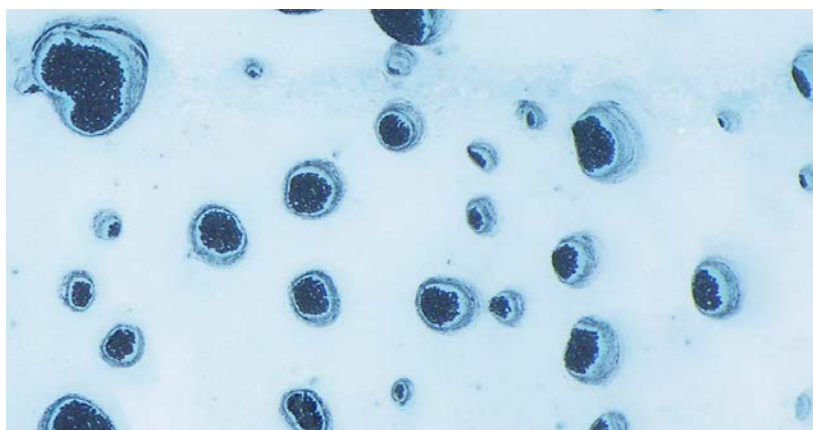
Cette technique repose sur le fait que différentes espèces synthétisent des molécules organiques qui leur sont propres et qui peuvent être préservées dans les sédiments pendant plusieurs millions d'années. Les molécules organiques extraites des divers sédiments ont permis de montrer que différents groupes 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 affluent. 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.

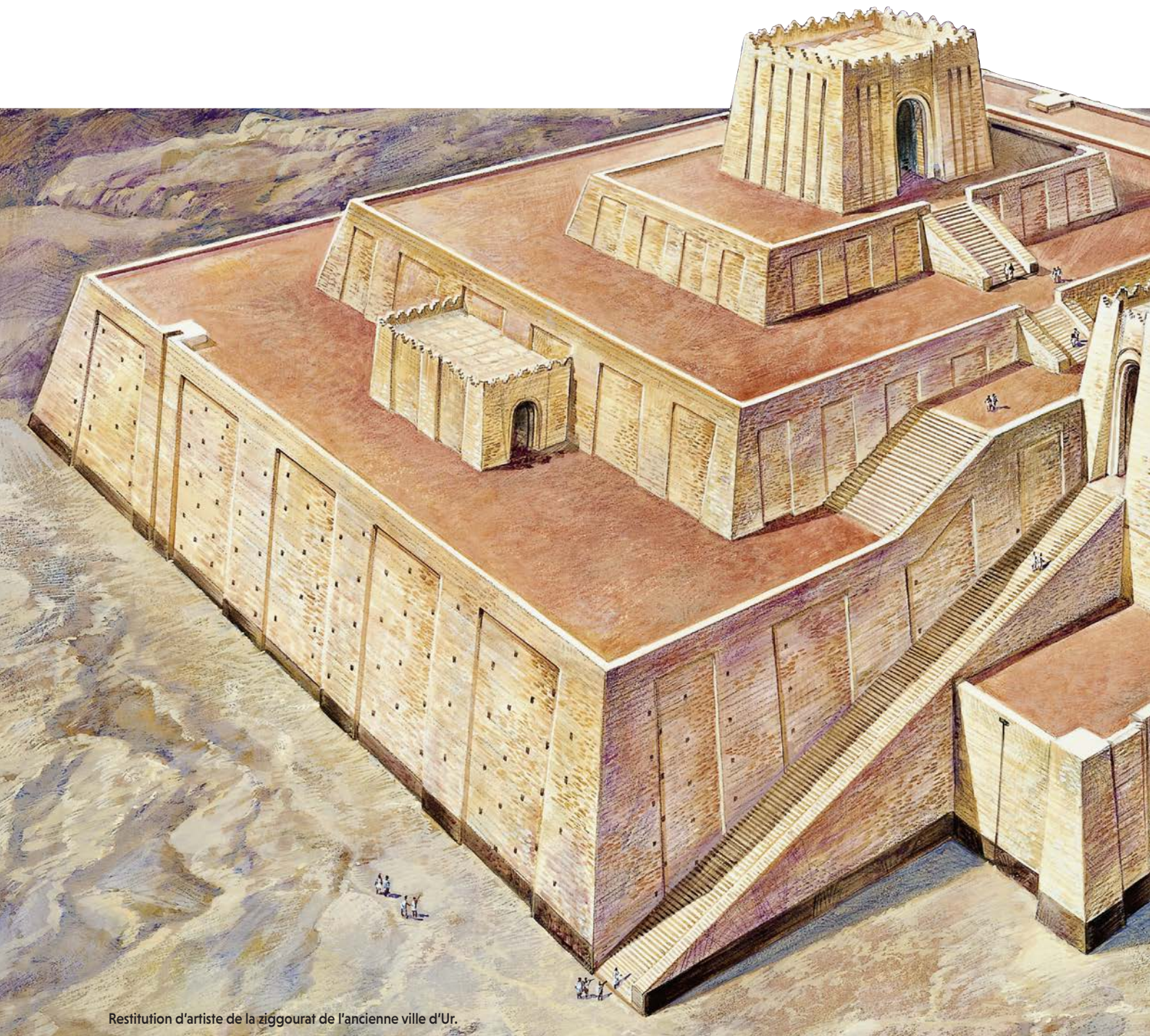
J. J. Brocks *et al.*, **The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals**, *Nature*, vol. 548, pp. 578-581, 2017.

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 CANCIK-
KIRSCHBAUM**
assyriologue
à l'université
libre de Berlin



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'imposants 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.

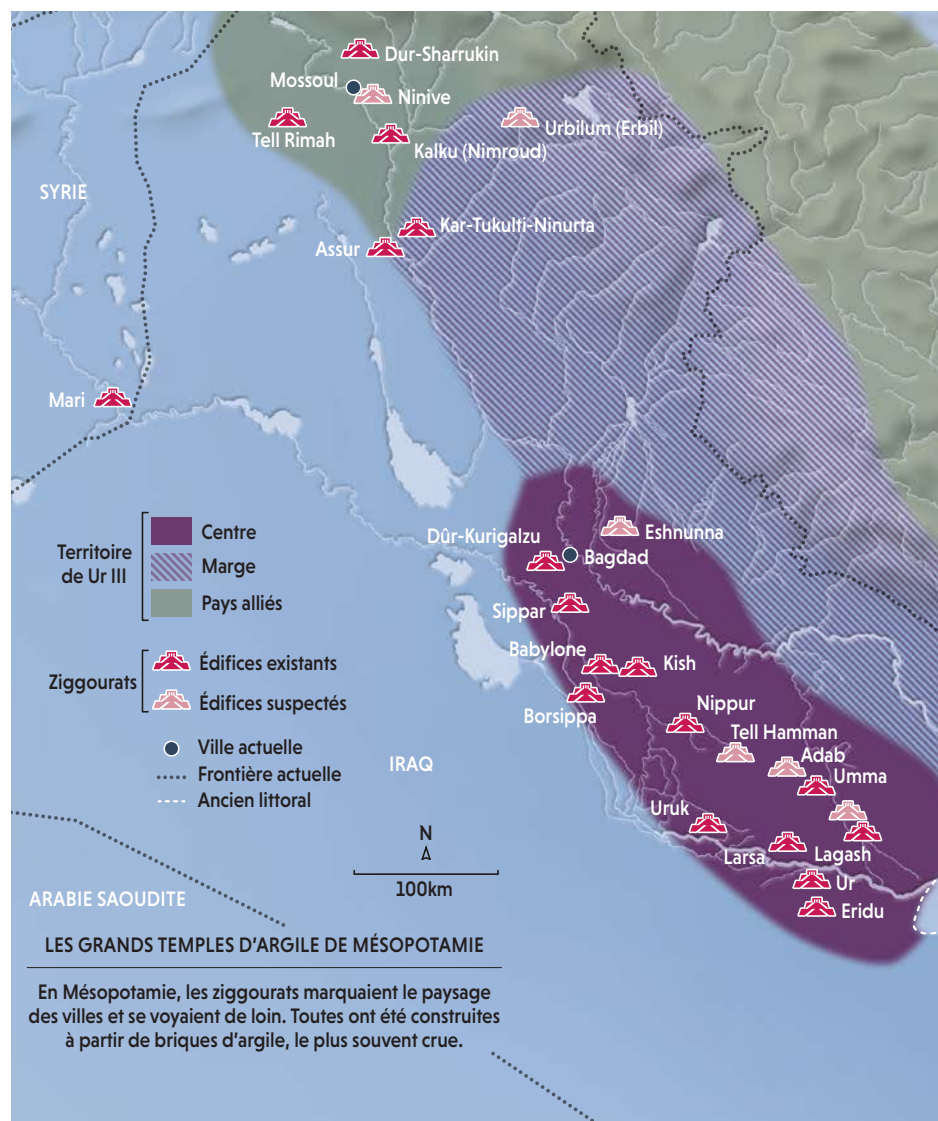
Si cette massive ziggourat était probablement la plus grande de Mésopotamie, elle n'était en aucun cas la seule. Depuis le III^e millénaire avant notre ère, d'imposants édifices à terrasses empilées façonnaient le paysage de nombreuses villes mésopotamiennes (voir la carte ci-contre). Visibles de loin 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 xx^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



briques d'argile nécessaires pour édifier un mur? Combien de jours-homme représentait un bâtiment? Pour répondre, ce sont les textes pédagogiques destinés à la formation des fonctionnaires aux mathématiques et aux méthodes de mesure qui sont utiles. Ils contiennent en effet de nombreux ordres de grandeur, tout particulièrement s'agissant des temps nécessaires pour accomplir les tâches.

Ces tablettes sont postérieures de deux à cinq siècles aux sources du xx^{e} siècle avant notre ère que nous mentionnions plus haut. Pour autant, il nous semble peu probable que la quantité de travail qu'effectuait un ouvrier en un jour ait beaucoup changé en ces quelques siècles. Si l'on s'en tient aux connaissances actuelles, aucune innovation technique n'est intervenue qui aurait entraîné une utilisation plus efficace de la main-d'œuvre. Il existe en outre de nombreuses indications que les problèmes mathématiques traités dans les manuels d'apprentissage, où figurent les ordres de grandeur en question, ont été mis au point très tôt; ils auraient même été déjà pertinents bien avant le xx^{e} siècle.

En 1999, Eleanor Robson, assyriologue à l'université de Cambridge, a utilisé ces textes pédagogiques pour déterminer le temps nécessaire à la production des briques de terre crue. La matière première, un mélange de loess et de sable, était disponible en abondance en Mésopotamie. Tandis que le loess lie les grains de sable, ces derniers supportent la charge. Quand la terre contenait trop de loess, on y ajoutait plus de sable, ainsi que des roseaux ou de la paille hachés.

Dans les textes d'apprentissage, on lit que le quota d'un ouvrier travaillant dans la fosse d'argile était de 20. Étant donné le système sexagésimal employé à l'époque babylonienne, cette spécification doit s'interpréter comme 20/60, c'est-à-dire $1/3$. Aucune unité de mesure n'est mentionnée, mais les experts s'accordent à dire que ce tiers se rapporte à l'unité usuelle de volume, à savoir le *sar*. Un *sar* serait égal à 12 coudées $\times$ 12 coudées $\times$ 1 coudée.

Sachant qu'une coudée mésopotamienne mesurait environ 0,5 mètre, un *sar* représentait donc à peu près $6 \times 6 \times 0,5 = 18$ mètres cubes. Un ouvrier travaillant dans la fosse à argile devait donc, d'après son quota, excaver $18/3$, soit de l'ordre de 6 mètres cubes de matière première par jour. Sans doute accomplissait-il ce labeur aux heures fraîches du matin et du soir, comme c'est toujours le cas aujourd'hui dans cette région.

La réalisation du mélange d'eau, de paille hachée et de sable prenait deux fois plus de temps, donc deux jours; enfin, l'ouvrier en question passait une autre journée à façonner les briques et à les mettre à sécher. Il est possible que d'autres personnes que les ouvriers terrassiers aient été chargées de disposer les briques au soleil, puis de les retourner encore et encore afin qu'elles sèchent uniformément. Bien que ce poste ne soit nulle part mentionné explicitement, il était probablement inclus dans le total des coûts de production. On estime donc que la production de briques représentait un travail de $4/6 = 2/3$ jour-homme par mètre cube de briques.

UNE MATIÈRE PREMIÈRE PRESQUE GRATUITE

Comme la terre argileuse était présente et disponible presque partout en Mésopotamie, la matière première ne coûtait pratiquement rien. Il en va très différemment de la nourriture et des salaires. Les registres salariaux des grands chantiers de construction énumèrent ces dépenses salariales en détail, qui reflètent des hiérarchies et des compétences diverses. Les producteurs de briques – toujours des hommes – touchaient un salaire quotidien de 5 à 6 kilogrammes d'orge ou plutôt de 5 à 6 litres, puisqu'à l'époque on mesurait les céréales plutôt en volume. Cela correspond à la rémunération quotidienne typique de journaliers et d'autres travailleurs embauchés à durée déterminée. On employait aussi des femmes pour certaines tâches, mais elles ne recevaient généralement que 3 litres de grain. Les employés permanents, qui devaient donc être entretenus à l'année, avaient des salaires journaliers inférieurs.

Compte tenu des durées estimées plus haut, nous estimons que le mètre cube de briques coûtait un salaire d'au moins 4 litres d'orge. Notons que la production des végétaux hachés et leur mélange à la terre avaient aussi un coût, mais les textes n'indiquent rien à ce propos. Les chercheurs partent du principe que la valeur de cette partie du travail de production de briques équivaut à 1 litre d'orge environ.

Les tablettes d'apprentissage des scribes ne livrent aucune information sur la sustentation des travailleurs du chantier de construction. Heureusement, les textes dits de Garshana comportent de tels renseignements. Les tablettes correspondantes ont été probablement mises au ➤

Produire des briques demandait environ $2/3$ jour-homme par mètre cube

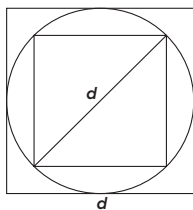
ALGÈBRE ET GÉOMÉTRIE SUR TABLETTES D'ARGILE

On attribue la formule reliant l'hypoténuse aux deux autres côtés d'un triangle rectangle à Pythagore, au VI^e siècle avant notre ère. Mais les mathématiciens babyloniens, 1300 ans auparavant, avaient déjà utilisé une version de ce théorème.

Ces derniers savaient aussi calculer de façon approchée une racine carrée, suivant une méthode que nous attribuons à Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle de notre ère). Ainsi, on peut lire sur la tablette d'un apprenti que l'approximation à 5 décimales de $\sqrt{2}$ vaut 1,24.51.10 en système sexagésimal (le système de numération de base 60), c'est-à-dire :

$1 + 24 \times 60^{-1} + 51 \times 60^{-2} + 10 \times 60^{-3}$,
ce qui fait bien, dans le système décimal, 1,41421...

Devant une telle précision, on s'étonne que l'aire d'un cercle (πr^2 où r est le rayon du cercle) ait été calculée par les Mésopotamiens par la formule $3r^2$ plutôt qu'à l'aide d'une valeur approchée de π comme 3,1415. Cela suggère que les mathématiciens mésopotamiens considéraient que cette aire était égale à la valeur moyenne des aires des carrés circonscrit et inscrit.



En effet, tandis que l'aire du carré circonscrit est d^2 , où d est le diamètre du cercle, le carré inscrit a pour aire $d^2/2$; la moyenne de ces deux quantités,



Cette tablette inscrite en cunéiforme, conservée au British Museum, traite de la construction de certaines figures géométriques.

c'est-à-dire $(d^2 + d^2/2)/2$, vaut bien $3d^2/4$, soit $3(d/2)^2$ ou encore $3r^2$.

Les scribes mésopotamiens étaient aussi capables de calculer les aires de figures compliquées. Un exemple impressionnant de ce savoir-faire est fourni par une tablette conservée au British Museum (ci-dessus). Son texte décrit la construction de certaines figures sans indiquer comment les calculer, mais il n'y

soit $1/3$, comme l'approximation babylonienne de $1/\pi$, et par ailleurs 5, c'est-à-dire $5/60 = 1/12$, comme l'approximation babylonienne de $1/(4\pi)$. Or ces facteurs permettent de calculer, à partir de la circonférence C du cercle, son diamètre $d = C/\pi$ et son aire $S = C^2/(4\pi)$.

On trouve aussi mentionnés sur la tablette les charges de travail représentées par certaines tâches, tout à fait comparables aux ordres de grandeur qui nous aident aujourd'hui à estimer des coûts de construction.

Les plus anciennes traces de mathématiques mésopotamiennes sont inscrites en protocunéiforme sur des tablettes de la ville d'Uruk datant du IV^e millénaire avant notre ère. Un scribe y calcula la superficie de champs à partir de rectangles et de quadrilatères irréguliers. Les Mésopotamiens calculaient leurs aires de façon approchée par des produits des valeurs moyennes des longueurs de côtés opposés, exactement comme procéderont les Romains quelque 3000 ans plus tard.

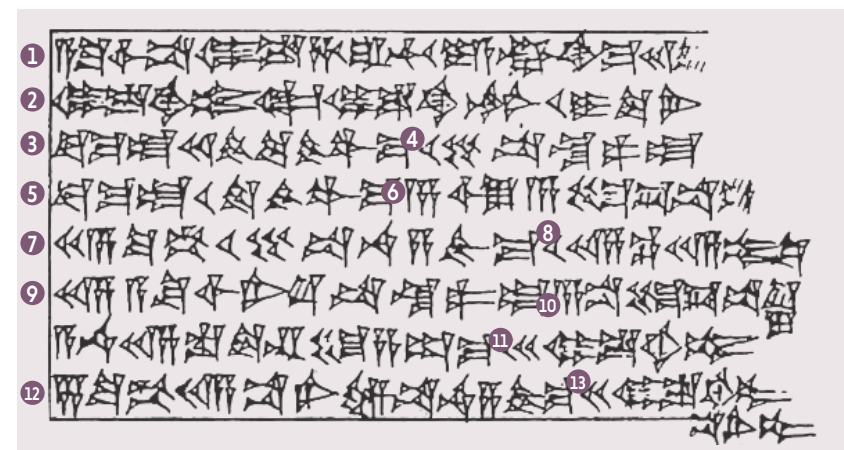
Même les abstractions n'étaient pas étrangères aux mathématiciens de Babylone. Ainsi, sur la tablette reproduite ci-dessus, l'un d'eux s'est servi d'étapes de pensée pour résoudre un système de deux inconnues composé d'une équation du deuxième degré et d'une équation du premier degré. Elle contient la solution complète du système d'équations ($x^2 + y^2 = a$; $y = x + b$) dans le cas concret où

Les plus anciennes traces de mathématiques mésopotamiennes sont sur des tablettes du IV^e millénaire

a aucun doute sur le fait que l'exercice correspondant a bien été résolu.

Dans la pratique quotidienne, les érudits employaient des listes qui avaient à peu près la fonction de nos tables numériques modernes. Ils contenaient toutes sortes de nombres utiles à la géométrie, aux techniques et à l'administration.

On y trouve par exemple des mentions du genre «20: diamètre du cercle» et «5: paramètre du cercle». Il faut ici entendre le chiffre sexagésimal 20/60,



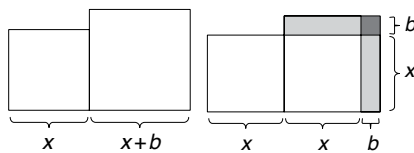
Une série de 13 étapes aboutissant à la résolution du système d'équations ($x^2 + y^2 = 1300$; $y = x + 10$) sont décrites sur une tablette babylonienne conservée au British Museum (en haut, rectangle blanc). Ces étapes sont indiquées sur la reproduction à grande échelle du contenu de ce passage (ci-dessus).

$a = 1300$ et $b = 10$. Dans la traduction qui suit, j'ai un peu complété le texte original et traduit en écriture décimale les nombres.

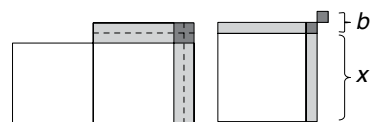
- 1 J'ai ajouté les aires de deux carrés et le résultat est 1300.
- 2 Le côté de l'un des carrés dépasse celui de l'autre de 10.
- 3 Tu prends la moitié de 1300 (mentionné à l'étape 1).
- 4 Tu écris 650 (le résultat).
- 5 Tu formes les moitiés de 10 (mentionné à l'étape 2).
- 6 Tu multiplies les (résultats) 5 entre eux.
- 7 Tu déduis (le résultat) 25 de 650.
- 8 La racine carrée (du résultat) 625 est 25.
- 9 Tu écris deux fois ces 25.
- 10 Tu ajoutes le 5, que tu as mis au carré (à l'étape 6) à l'un des 25 (mentionné à l'étape 9).
- 11 (Le résultat) 30 est le côté du plus grand carré.
- 12 Tu retires le 5 (que tu as élevé au carré à l'étape 6) du deuxième 25 (mentionné à l'étape 9).

13 (Le résultat) 20 est le côté du plus petit carré.

Cette suite d'étapes conduisant à la solution peut être interprétée ainsi. On a deux carrés, l'un de côté x et l'autre de côté $y = x + b$. Le plus grand carré peut être vu comme le premier que l'on a augmenté d'un «supplément» :

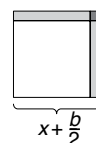


Ce supplément correspond aux deux rectangles gris clair ci-dessus (de largeur b et de hauteur x) et au carré gris foncé de côté b . À l'étape 3, on retire la moitié de l'aire totale (à savoir ici a , c'est-à-dire 1300). Cela peut être réalisé géométriquement en enlevant à l'un des deux carrés blancs (de même taille) la moitié de l'une des bandes gris clair et deux quarts du petit carré gris foncé :



La figure qui en résulte a pour aire $a/2$, c'est-à-dire 650. Chacun des carrés gris foncé qui restent a pour côté $b/2$ (soit, ici, 5) et donc pour aire $(b/2)^2$ (soit, ici, 25).

À l'étape 7, un tel carré est retiré de la nouvelle figure («Tu déduis (le résultat) 25 de 650»), par exemple le carré se trouvant à l'extérieur. Il reste donc un carré de longueur $x + b/2$.



Son aire est égale à $650 - 25$, soit 625. À l'étape 8, on en prend la racine carrée. le résultat (25) est le côté du carré, donc $x + b/2$. Ce résultat intermédiaire doit être écrit deux fois (étape 9), puis subir deux opérations différentes: l'addition de $b/2$ (étape 10) donne $x + b$, donc le côté du grand carré d'origine (étape 11); la soustraction de $b/2$ donne le côté du petit carré d'origine (étape 13).

Cet algorithme fonctionne aussi quand on utilise d'autres valeurs que 1300 pour a et 10 pour b . Il est aujourd'hui indiscutable que les mathématiciens babyloniens le savaient. Comme l'avait déjà constaté dans les années 1930 Otto Neugebauer, le pionnier de l'étude des mathématiques décrites sur les tablettes mésopotamiennes, les Mésopotamiens employaient des chiffres concrets pratiquement comme des variables.

Ils ont même résolu des généralisations du problème évoqué ici, où l'on ne cherche pas seulement les côtés de deux carrés, mais ceux de n carrés, dont le côté de chacun est toujours augmenté de b par rapport à celui de son prédécesseur, tandis que l'aire totale de cette série de carrés est prescrite.

HAGAN BRUNKE

H. Brunke, *Überlegungen zu Raumerfassung und Flächenrechnung in Mesopotamien*, *eTopoi Journal for Ancient Studies*, vol. 4, pp. 1-17, 2015.

J. Høyrup, *L'Algèbre au temps de Babylone. Quand les mathématiques s'écrivaient sur de l'argile*, Vuibert/Adapt-Snes, 2010.

> jour illégalement par des voleurs après la première guerre du Golfe en 1990-1991, puis vendues hors du pays. Elles ont fini par atterrir dans la collection de l'université Cornell, à Ithaca. Au début des années 2000, Rudolf Mayr et David Owen, assyriologues de cette université, ont identifié qu'elles constituaient un corpus, puis les ont publiées en 2007. Nous ignorons où précisément se trouvait le site de Garshana mentionné sur ces tablettes (peut-être près d'Umma) ; il ne s'agissait probablement pas d'une ville, mais d'une localité de plus petite taille, sans doute dépourvue d'un domaine agricole propre.

BASE COMPTABLE : L'ORGE

D'après ces textes, les travailleurs et les scribes participant à la construction recevaient de la bière, du pain et une sorte de gruaux à base de farine de céréales bouillies, qui était enrichie de haricots et de pois chiches. La quantité perçue dépendait du statut et de l'âge de l'employé. Ainsi, les maçons percevaient 1 litre de bière, 1/2 litre de gruaux et 1 litre de pain (le pain aussi était mesuré en volume) par jour, tout comme les scribes qui administraient le chantier. Les manœuvres non qualifiés recevaient 1 litre de bière, mais devaient se contenter de 1/2 litre de pain et 1/3 litre de gruaux par jour. Le même texte mentionne aussi des aides des deux sexes, probablement des enfants, qui recevaient encore moins : 1/3 litre de bière, de pain et de gruaux chacun.

La conversion de tous les coûts en quantités alimentaires afin de pouvoir établir des bilans atteste l'efficacité avec laquelle les scribes géraient le temps de travail. On utilisait en général l'orge comme base comptable. Toutes les entrées et sorties de marchandises étaient traduites en valeurs mesurées dans cette « monnaie unique ». Deux litres d'orge correspondaient ainsi à un litre de blé ; selon la qualité et le type de farine, 1 litre de pain équivalait à 1 ou 2 litres d'orge ; 1 litre de bière équivalait, selon sa teneur, à 1 à 3 litres d'orge.

En 2011, l'un d'entre nous (Hagan Brunke) a découvert que ces conversions prenaient en compte non seulement le coût des matières premières, mais aussi les coûts de production, par exemple les salaires des boulangers et des brasseurs. Le fait que les facteurs de conversion soient restés constants, alors que les prix du marché fluctuaient forcément, permet de s'appuyer sur des textes provenant d'époques très éloignées les unes des autres. Si le pain et la bière utilisés dans les briqueteries et sur les chantiers étaient équivalents en valeur à la même quantité d'orge, il semble que les ouvriers ne recevaient que la qualité la plus simple. La farine d'orge précuite qui servait de base aux gruaux, quant à elle, avait, à volume égal, la valeur de une fois et demie celle d'un même

volume de grain non travaillé, ce qui montre que l'on tenait compte du travail associé au séchage et à la précuisson.

Au total, les rations journalières d'un maçon ou d'un scribe coûtaient l'équivalent d'environ 2,4 litres d'orge, tandis que le travailleur non qualifié coûtait environ 1,75 litre. Nous n'avons pas encore d'informations comparables quant à l'offre alimentaire dans la briqueterie ; mais si les hommes qui y travaillaient recevaient autant que les maçons, ce qui est plausible, il faut ajouter environ 1,6 litre d'orge par mètre cube de briques aux coûts salariaux susmentionnés.

Des considérations similaires s'appliquent aux autres étapes du travail. De nombreux textes sur l'arpentage mentionnent des carrières d'argile à la lisière des vastes terres agricoles. C'est là, sans doute, que l'on produisait les briques. Pour les transporter jusqu'au chantier de construction, on les chargeait probablement sur des barges circulant sur le vaste réseau de chenaux dont était parcourue la Mésopotamie. Des porteurs acheminaient les matériaux de construction jusqu'à des embarcadères, ou des débarcadères jusqu'aux chantiers.

En 2009, l'orientaliste allemand Wolfgang Heimpel a déterminé l'efficacité de ces travailleurs de force à partir des textes de Garshana. Selon ses calculs, un porteur acheminait en moyenne 20 kilogrammes par jour sur une distance cumulée de 25 kilomètres. Malheureusement, il n'est guère possible de calculer plus précisément le coût de transport, car les distances à parcourir variaient d'un chantier à l'autre. Or elles n'ont jamais été notées. Quoi qu'il en soit, les estimations du coût global mettent en évidence que chaque kilomètre supplémentaire à parcourir avait un impact notable. C'est probablement pourquoi, au début de certains grands projets de construction, on prenait la peine de creuser de nouveaux canaux, que l'on rebouchait ultérieurement. Le coût du terrassement nécessaire valait l'investissement, car les grands projets s'étendaient sur de nombreuses années.

S'agissant de la construction proprement dite, les tablettes cunéiformes fournissent la valeur moyenne de 3 mètres cubes de mur par personne et par jour. Il est peu probable que les maçons effectuaient eux-mêmes les



LE ROI CONSTRUIT UN TEMPLE

Qui est ce porteur glabre et au crâne rasé, un panier de terre sur la tête ? L'inscription en cunéiforme nous apprend que cette figurine de bronze représente le roi Ur-Nammu construisant la « maison des dieux », c'est-à-dire le temple Éanna dans la ville d'Uruk. De tels « clous de fondation » étaient placés dans les fondements des nouveaux temples lors de la cérémonie marquant le début du chantier.

Coût de la construction de 1 mètre cube de mur: environ 25 litres d'orge

nombreux travaux préparatoires et d'accompagnement, tels que le brassage et le transport du mortier, la manutention des pierres et enfin le crépissage.

Certaines des tablettes de Garshana suggèrent qu'un groupe de maçons se composait d'un maître maçon, de 7 maçons qualifiés et de 80 à 120 manœuvres masculins ou féminins. Il est difficile de rendre compte ici de la structure salariale d'une telle équipe compte tenu des hiérarchies entre maçons et manœuvres ou entre hommes et femmes. Nous avons fait les calculs en considérant que les maçons atteignaient leurs quotas de 3 mètres cubes par jour et en prenant en compte les très divers frais de bouche et de salaires perçus par les travailleurs, qualifiés ou non, hommes ou femmes. Nous sommes ainsi parvenus à la conclusion que le coût en salaire et nourriture de la construction de 1 mètre cube de mur s'élevait à environ 25 litres d'orge.

Des raisonnements similaires s'appliquent aux équipes de terrassiers et de porteurs. En tenant compte du résultat concernant les maçons que nous venons de présenter, nous avons trouvé que 1 mètre cube de mur coûtait ainsi, de la production des briques nécessaires jusqu'à son achèvement, de l'ordre de 54+18D litres d'orge, où D est la distance en kilomètres que les porteurs devaient parcourir. Cette formule ne tient pas compte des coûts supplémentaires dus aux déchets de production, aux bris de briques durant le transport ou aux absences pour maladie des travailleurs. Mais il est peu probable que ces imprévus changeaient l'ordre de grandeur du coût total.

3 MILLIONS DE LITRES D'ORGE POUR LA ZIGGOURAT D'URUK

Prenons l'exemple de la ziggourat du sanctuaire d'Eanna (en sumérien *é-an-na*, soit la « maison du ciel ») de la ville d'Uruk, l'un des sanctuaires les plus importants de Mésopotamie. Grâce aux fouilles effectuées par l'Institut archéologique allemand sous la direction de Margarete van Ess, nous disposons de nombreuses données. D'après elle, le roi Ur-Nammu (2112-2095 avant notre ère)

fit entièrement remanier le temple. Nous ignorons si l'ancien bâtiment a été complètement ou partiellement démoli et nous n'en connaissons pas les coûts. Cependant, la refonte était tellement importante qu'elle équivalait à la construction d'un bâtiment neuf. La terrasse inférieure occupait à elle seule près de 2700 mètres carrés et mesurait 11,2 mètres de haut; la hauteur totale de la nouvelle ziggourat était probablement de 28 mètres. Il en résulte un volume total de plus de 41500 mètres cubes. En faisant l'hypothèse optimiste que les porteurs parcouraient une distance de 1 kilomètre seulement, on parvient à un coût total de construction qui dépasse les 3 millions de litres d'orge.

Pour mettre en perspective ce chiffre, on peut tirer profit des calculs relatifs à la productivité de l'agriculture mésopotamienne; ces calculs se fondent eux aussi sur les bilans établis par les scribes. Grâce à la fertilité des zones alluviales et à l'ingénieuse irrigation, la production céréalière atteignait entre 900 et 1350 litres par hectare de terre arable. On effectuait deux récoltes par an. Si l'on suppose une durée de construction de dix ans – le roi Ur-Nammu a régné pendant seize ans, mais il a dû commander les travaux et les voir achevés –, on parvient à la conclusion qu'une surface de 134 hectares de champs d'orge a été nécessaire pour financer le chantier.

Compte tenu de l'importance des superficies cultivées telles que les documentent les textes administratifs, le produit total de l'agriculture excédait plusieurs fois cette dépense. Même si les calculs ne prennent pas en compte l'utilisation d'autres matériaux de construction tels que le bois, les roseaux ou le bitume et les éléments décoratifs, on constate ainsi que certains au moins des grands projets ne pesaient pas trop lourdement sur l'État.

La situation sera bien différente avec la rénovation de Babylone par Nabuchodonosor II, quelque 1500 ans plus tard. D'une part, la ziggourat de cette cité, la fameuse « tour de Babel », était 8 fois plus grande en volume que celle d'Eanna et n'était que l'un des nombreux chantiers de construction. D'autre part, la hausse du niveau de la nappe phréatique a rendu nécessaire, pour assurer l'étanchéité, l'utilisation de briques cuites et de bitume comme agrégat de mortier. Les villes et les temples de l'Empire babylonien ont ainsi dû ployer sous le travail et les impôts nécessaires. Nous n'avons pour l'heure aucune idée du coût, sûrement très élevé, de la rénovation de Babylone. Comment les habitants de la Mésopotamie ont-ils supporté la charge d'une telle entreprise? L'Empire était-il alors en déséquilibre économique? Tenter de répondre à ces questions à l'aide des méthodes que nous avons développées promet d'être passionnant. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Brunke, « **Großbaustellen in Sumer. Aufwand und Kosten** », in **Groß Bauen**, Birkhäuser, pp. 27-36, 2017.

H. Brunke, « **Feasts for the living, the dead, and the Gods** », in **The Oxford Handbook of Cuneiform Culture**, Oxford University Press, pp. 166-182, 2011.

E. Cancik-Kirschbaum et al. (éd.), « **Babylon. Wissenskultur in Orient und Okzident** », in **Topoi Studies of the Ancient World**, vol 1., De Gruyter, 2011.

K. Kleber, **Tempel und Palast. Die Beziehungen zwischen dem König und dem Eanna-Tempel im spätbabylonischen Uruk**, Ugarit-Verlag, 2008.

L'ESSENTIEL

> En facilitant l'accès des femmes au marché de l'emploi, à l'éducation et à la contraception, on améliore le bien-être de tous.

> Malgré de notables progrès dans la lutte contre les inégalités entre les hommes et les femmes dans le monde, en particulier dans les pays

en développement, certaines disparités, notamment économiques, restent difficiles à éliminer.

> Les politiques et les initiatives qui s'attaquent aux normes sociales profondément enracinées constituent les solutions les plus prometteuses. Elles sont à intensifier et à étendre.

LES AUTEURES



ANA L. REVENGA
économiste en chef
adjointe
au Groupe de la
Banque mondiale



ANA MARÍA
MUÑOZ BOUDET
chercheuse
en sciences sociales
au Groupe de la
Banque mondiale

La dure réalité du travail au féminin

Dans tous les pays, y compris les plus avancés, la route vers l'égalité femmes-hommes dans le monde du travail est difficile. Comment surmonter les obstacles ?

Ces cinquante dernières années, les femmes et les jeunes filles vivant dans les pays en développement ont bénéficié de nombreuses avancées. Plusieurs chiffres

l'illustrent. Prenons par exemple l'espérance de vie à la naissance : elle est passée de 54 ans en 1960 à 72 ans en 2008. Durant cette même période, nous avons assisté à la baisse de fécondité la plus rapide qu'on ait connue. Ces changements traduisent les grands progrès de la condition des femmes dans bien des domaines, de l'éducation à l'emploi en passant par la contraception et le pouvoir de décision. Et tout cela s'est passé bien plus vite que dans les pays développés. Il n'a fallu à l'Inde que 44 ans et à l'Iran seulement 10 ans pour que le nombre d'enfants par femme passe de 6 à 3 ; aux États-Unis, cela avait pris 123 ans.

Deux tiers des pays du monde ont atteint la parité filles-garçons dans l'accès à l'éducation primaire, et dans plus d'un tiers des cas, l'école est fréquentée par plus de filles que de garçons. On a un renversement frappant des tendances

historiques : les femmes représentent désormais la majorité des diplômés d'université, et plus de 500 millions de femmes ont intégré le marché du travail ces 30 dernières années. Si bien que, aujourd'hui dans le monde, 40% des personnes ayant un emploi sont des femmes.

Pourtant, malgré tous ces progrès, les différences qui subsistent entre hommes et femmes résistent obstinément. Même si les femmes vivent en moyenne plus longtemps que les hommes, dans certains endroits du monde tels que l'Afrique subsaharienne, une femme a autant de risque de mourir en couches qu'une Européenne du Nord en avait au XIX^e siècle, avant l'apparition des antibiotiques. Encore aujourd'hui, les femmes occupent moins de postes à responsabilité en politique et dans le monde des affaires que les hommes. Et même si beaucoup travaillent en échange d'un salaire, leurs capacités et leur niveau d'instruction ne sont pas pris en compte de la même façon que pour leurs homologues masculins.

Ces inégalités sont révoltantes et tenter de les éliminer est à la fois une question de droit et un objectif majeur du progrès >