

toxiques pour la reproduction et le fonctionnement de certains gènes ni mutagènes.

Dans la pratique, cette limite de détection est souvent interprétée comme un seuil de sécurité. Mais à titre de comparaison, aux États-Unis, le seuil de réglementation est 20 fois inférieur. Ces approches fondées sur un seuil sont inadéquates, car elles reposent sur l'idée que «la dose fait le poison». Or diverses études ont montré que des faibles doses peuvent engendrer des effets supérieurs à ceux produits par des fortes doses. Par exemple, chez la souris, l'exposition quotidienne au bisphénol A peut induire la prolifération de cellules cancéreuses à une dose de 2,5 microgrammes par kilogramme de poids corporel et par jour, comme l'ont montré Sarah Jenkins, de l'université de l'Alabama à Birmingham, en 2011. Et c'est aussi le cas lorsque les souris sont exposées à une dose 10 fois supérieure, mais pas pour des doses 100 et 1000 fois supérieures.

MOINS DE MÉLANGES, MOINS DE RISQUES

Cependant, des changements sont possibles. La première chose serait de réduire la complexité des mélanges de substances autorisées entrant dans la composition des plastiques. Le nombre de ces substances est colossal : les réglementations de l'Union européenne et de ses États membres listent un total de 8030 substances autorisées dans différents types d'articles en contact avec les aliments. Aux États-Unis, 10787 substances sont autorisées comme additifs alimentaires directs ou indirects. Ils sont généralement admis comme étant sûrs, mais ne sont pas notifiés à la Food and Drug Administration et aucun registre public sur leur utilisation n'est disponible. En général, les informations sur l'utilisation réelle d'un composé dans les matériaux plastiques (et ses concentrations d'usage) sont donc très difficiles à obtenir.

Une autre piste est de prendre en considération les effets biologiques des mélanges de molécules. En 2012, une équipe américaine autour de Youngja Park, de l'université Emory, à Atlanta, a mesuré plus de 3000 substances exogènes dans le sang humain. Elle a aussi fréquemment trouvé plusieurs de ces xénobiotiques dans le placenta et le sang du cordon ombilical des femmes enceintes testées, ce qui indique que l'exposition du fœtus à des mélanges de xénobiotiques est la norme. Les effets sur la santé de cette exposition à des mélanges pendant les premières années de la vie restent largement inconnus, mais les scientifiques s'accordent sur l'extrême importance des 1000 premiers jours, où tout l'organisme se met en place.

De nouvelles méthodes se développent dans ce sens, prenant en compte plusieurs idées qui pourraient limiter les incertitudes,



L'innocuité des composés devrait être prouvée avant toute utilisation



comme étudier les effets de l'exposition sur les périodes de vulnérabilité, adopter des approches sans seuil, ou encore améliorer la sensibilité et la robustesse des tests utilisés. Une des pistes les plus prometteuses est d'utiliser des tests biologiques *in vitro* et *in vivo* sur des modèles alternatifs (cellules, organoïdes, xénope, poisson-zèbre ou medaka...) pour évaluer la toxicité de l'ensemble des migrations qui s'échappent du produit final.

Par rapport à l'analyse chimique de composés cibles sélectionnés, ces tests intègrent la toxicité des mélanges qui s'échappent des plastiques, les substances connues dont la toxicité est inconnue et les composés réellement inconnus. En outre, il est possible d'identifier les substances à l'origine de la toxicité en couplant les tests biologiques à l'analyse chimique. De telles approches sont en cours de développement, notamment dans notre laboratoire. Certains aspects doivent encore être améliorés, en particulier pour harmoniser les méthodes d'échantillonnage et limiter les biais, mais les premiers résultats devraient tomber dans quelques mois (voir l'encadré page ci-contre).

Enfin et surtout, il est primordial d'utiliser cette méthodologie en amont de la mise sur le marché. Même dans un monde idéal où l'économie circulaire fonctionnerait et où les ressources plastiques seraient mieux recyclées, il serait essentiel de s'assurer qu'aucun produit chimique dangereux n'est présent dans ces matériaux tant il est difficile de gérer efficacement leurs risques. La solution passe donc par un renforcement des tests à imposer avant la mise sur le marché.

On le voit, il est plus que jamais urgent d'inverser le postulat de départ selon lequel les composés sont sûrs jusqu'à preuve du contraire. Leur innocuité doit être prouvée avant toute utilisation. En attendant, nous avons tous un rôle à jouer à l'échelle individuelle en limitant notre utilisation des contenants et sacs plastiques, qu'ils soient «bio» ou non. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Muncke *et al.*, **Impacts of food contact chemicals on human health : a consensus statement**, *Environ. Health*, vol. 19, article 25, 2020.

L. Zimmermann *et al.*, **Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics ? In vitro toxicity and chemical composition**, *Environ. Int.*, vol. 145, article 106066, 2020.

P. Darbre, **Chemical components of plastics as endocrine disruptors : Overview and commentary**, *Birth Defects Research*, vol. 112, pp. 1300-1307, 2020.

J. A. Conesa et M. E. Iñiguez, **Analysis of microplastics in food samples**, dans T. Rocha-Santos *et al.*, **Handbook of Microplastics in the Environment**, Springer, 2020.

Imprégnation de la population française par les phtalates, Santé Publique France, 2019.

L. Birgersson *et al.*, **From cohorts to molecules : Adverse impacts of endocrine disrupting mixtures**, *Biorxiv*, 2017.

YVAN PAILLER est archéologue et responsable d'opération à l'Inrap Grand-Ouest et titulaire de la chaire Armerie (Archéologie maritime et recherche interdisciplinaire environnementale) instituée par l'université de Bretagne occidentale et par l'Inrap (Institut national de recherches archéologiques préventives). Ses travaux portent essentiellement sur le Néolithique et les débuts de l'âge du Bronze dans l'ouest de l'Europe.



CLÉMENT NICOLAS est archéologue et postdoctorant Marie-Curie à l'université de Bournemouth, en Angleterre. Ses recherches portent sur les premières sociétés métallurgiques des III^e et II^e millénaires avant notre ère en Europe.



La dalle de Saint-Bélec serait la plus ancienne carte connue en Europe

En 1900, une grande dalle gravée d'un réseau complexe de lignes fut mise au jour dans un tumulus breton de l'âge du Bronze. Redécouverte en 2014, elle vient d'être étudiée : il s'agit sans doute d'une carte représentant le territoire de l'un des princes qui régnaient dans la région. Clément Nicolas et Yvan Pailier, les deux principaux auteurs de l'étude, nous expliquent pourquoi.

Cette dalle en schiste est, selon vous, la carte d'un territoire. Lequel ?

Yvan Pailier : La dalle gravée du tumulus de Saint-Bélec représente la haute vallée de l'Odette et d'autres rivières environnantes à l'âge du Bronze ancien, c'est-à-dire entre 2100 et 1600 ans avant notre ère environ. L'Odette est un petit fleuve qui prend sa source dans les montagnes Noires, en Bretagne.

Comment vous êtes-vous intéressés à cet objet ?

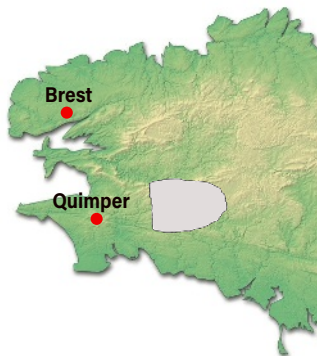
Yvan Pailier : Pendant nos thèses de doctorat, nous avons, indépendamment l'un de l'autre, lu l'article du *Bulletin de la Société archéologique du Finistère* que lui avait consacré en 1900

Paul Du Chatellier, grand archéologue breton de la seconde partie du XIX^e siècle et du début du XX^e siècle.

Clément Nicolas : Nous en avons discuté par hasard et découvert que nous avions tous les deux la même intuition, à savoir que les gravures de la dalle constituent une carte. Nous avons testé plus tard cette idée en demandant aux enfants de CE2 et de CM2 de l'école Victor-Hugo, à Saint-Nazaire, d'interpréter spontanément la dalle. La plupart de ces enfants y ont vu une «carte» ou un «plan»...

Et vous avez entrepris de le prouver ?

Yvan Pailler : Oui, mais pour cela il nous a d'abord fallu retrouver la dalle. Hormis l'article de Du Chatellier, elle n'a pratiquement jamais été mentionnée dans la littérature scientifique, à part une fois dans les années 1990, au détour d'une phrase de Jacques Briard, grand spécialiste de l'âge du Bronze en Europe. En enquêtant, nous avons appris qu'en 1924 les enfants de Du Chatellier avaient vendu au Musée national d'archéologie, à Saint-Germain-en-Laye, la collection du musée privé d'archéologie créé au château familial de Kernuz, à Pont-l'Abbé. Nous nous sommes donc rendus à Saint-Germain-en-Laye. Là, après quelques péripéties, nous avons retrouvé la dalle de Saint-Bélec. Elle était assez mal protégée dans une cave



humide. Ses conditions de conservation n'y étaient pas idéales, mais elles s'étaient déjà améliorées, puisque la dalle venait de passer pratiquement un siècle à l'air libre dans les douves du château royal de Saint-Germain-en-Laye, qui accueille le musée!

Clément Nicolas : Pendant cette période, elle n'avait jamais été référencée dans le patrimoine national et sa vraie origine était sur le point d'être oubliée.

Vous connaissiez cependant bien son origine, grâce à l'article de Paul Du Chatellier ?

Yvan Pailler : Absolument. Nous savions que la dalle constituait l'un des murs du caveau d'une vaste tombe, aménagée pendant l'âge du Bronze dans un champ qui se trouve aujourd'hui à 1,5 kilomètre de Leuhan, un village du Finistère. Comme à son habitude, Du Chatellier avait pratiqué une fouille en puits au centre de ce tumulus de 40 mètres de diamètre et de 2 mètres de haut, qui est aujourd'hui arasé. Comprenant l'intérêt de sa trouvaille, il était revenu trois mois plus tard avec une quinzaine d'ouvriers afin de transporter cette pierre de deux tonnes à Kernuz.

Comment l'avez-vous étudiée ?

Clément Nicolas : Pour numériser cette dalle, nous avons commencé par faire de la



La dalle ornée de Saint-Bélec (ici vue par le haut) mesure environ 2 mètres de longueur, pour une épaisseur d'une quinzaine de centimètres. Elle représenterait le territoire d'environ 30 par 20 kilomètres indiqué en gris sur la carte ci-dessus.