

L'ESSENTIEL

> Depuis les années 1950, plusieurs milliards de tonnes de plastiques se sont accumulées dans l'environnement, où ils persistent sous la forme de fragments de différentes tailles allant jusqu'à l'échelle nanométrique.

> Cette pollution en cache une autre : celle des multiples additifs, impuretés, produits secondaires et monomères qui, outre les polymères issus du pétrole, interviennent dans la composition des plastiques.

> De telles substances entrent aussi dans la composition des bioplastiques. Libérées au fil du temps, elles contaminent les liquides, les solides et l'air environnants.

> Les scientifiques développent de nouvelles méthodes pour évaluer leurs effets sur la santé et l'environnement.

L'AUTEUR



JEAN-BAPTISTE FINI
professeur et biologiste spécialiste des perturbateurs endocriniens au sein du laboratoire Physiologie moléculaire et adaptation, au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

La pollution invisible des plastiques

Contenants, vêtements, pneus, meubles, masques... Quelle que soit leur utilisation, les plastiques contiennent de multiples substances qui diffusent dans l'environnement. On commence à mesurer l'ampleur du phénomène.

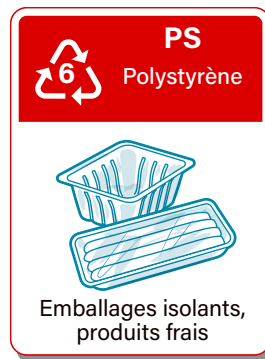
Chaque année, les humains déversent plus de 100 millions de tonnes de déchets plastiques dans la nature. De fait, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, le plastique a envahi nos sphères professionnelles et privées et fait partie intégrante de notre vie quotidienne. Dans cette ère du « Plastocène », l'humanité a produit 8,3 milliards de tonnes de plastiques entre 1950 et 2015, selon les estimations de Roland Geyer, de l'université de Californie à Santa Barbara, Jenna Jambeck, de l'université de Géorgie, aux États-Unis, et leurs collègues. Et la production ne cesse de croître : à hauteur de 2 millions de tonnes en 1950, elle atteignait près de 400 millions de tonnes en 2015, dont près de 40 % d'emballages.

Aujourd'hui, quelque 6 milliards de tonnes de plastiques se seraient accumulées dans la nature, dont une part non négligeable dans les océans – le tristement célèbre septième

continent. Selon la même équipe, durant la seule année 2015, entre 5 et 14 millions de tonnes de déchets plastiques auraient atteint la mer. En effet, que ce soit sur terre ou en mer, ces déchets ne se décomposent pas. Qu'ils soient ingérés ou non, ils se fragmentent peu à peu jusqu'à devenir des microplastiques, voire des nanoplastiques (*voir l'encadré page 57*).

Or cette pollution bien visible, à l'œil nu ou au microscope, cache une pollution plus insidieuse : celle des multiples composés entrant dans la fabrication des plastiques aux côtés des polymères qui les constituent. En effet, on s'est aperçu ces dernières années qu'au fil du temps, ces composés se détachent peu à peu des polymères plastiques et diffusent dans l'environnement. Un phénomène dont on commence à saisir l'ampleur et les effets potentiels sur la santé et l'environnement.

Les plastiques sont des matériaux abordables et peu coûteux à produire, légers, résistants et polyvalents. Les principaux polymères



utilisés pour les fabriquer sont classés en sept familles repérées par un numéro et une icône qui indique qu'en théorie ces plastiques sont recyclables (voir la figure ci-dessus). En pratique, c'est loin d'être le cas (voir l'article de Nathalie Gontard page 46). À côté de ces sept familles, notamment très utilisées pour les contenants alimentaires, les industriels développent constamment de nouvelles formulations fondées sur des mélanges complexes de monomères différents. Mais, quel que soit le plastique considéré, d'un point de vue chimique, ses composés principaux – les monomères qui s'assemblent pour former les polymères – ne sont pas ses seuls composants. Les industriels utilisent de multiples additifs en quantités variables dans leurs formulations.

DE MULTIPLES ADDITIFS

Ces additifs tels que des plastifiants, des retardateurs de flamme, des stabilisateurs, des antioxydants ou des pigments permettent de modifier l'aspect du plastique ou d'améliorer sa fonctionnalité. Outre ces additifs, on trouve aussi dans les plastiques des monomères non polymérisés et des substances ajoutées non intentionnellement (ou *Nias*, pour *Non-intentionally added substances* dans la réglementation européenne), comme des impuretés et produits secondaires ou de dégradation. Or la plupart de ces éléments ne sont pas chimiquement liés de manière covalente au polymère. Ils peuvent donc être libérés lors du cycle de vie des plastiques soit par migration vers des liquides ou des solides soit par volatilisation. Il en résulte un transfert de ces substances

dans les produits alimentaires emballés ainsi que dans les environnements humains (air intérieur, poussières domestiques) et naturels (les rivières et les mers).

Plus de 1200 études scientifiques démontrent clairement la migration de plusieurs molécules à partir de matériaux plastiques en contact avec les aliments. Cette migration est augmentée par la température, la durée de stockage et la composition chimique de l'article en contact. Pour les aliments, l'épaisseur de la couche en contact avec les aliments et la taille de l'emballage sont aussi des paramètres aggravants, la migration étant proportionnellement plus élevée dans les emballages de petite taille en raison de l'augmentation du rapport surface/volume. Du simple fait de leur abondance, les matières plastiques constituent donc une source importante d'exposition humaine à ces substances. Avec quels effets sur la santé et l'environnement? C'est toute la question.

Un exemple édifiant des effets potentiels de ces molécules sur la santé humaine est venu des travaux d'Ana Soto et Carlos Sonnenschein, de l'université Tufts, à Boston, et leurs collègues, en 1991. Ces chercheurs avaient développé un test fondé sur la prolifération de cellules humaines de cancer du sein sous l'action d'œstrogènes, les hormones féminines. Ce test permettait d'évaluer le pouvoir anticancéreux de médicaments potentiels. De façon fortuite, ces biologistes se sont aperçus que le *p*-nonylphénol, un tensioactif utilisé dans une nouvelle formulation de tubes en plastique (et toujours utilisé dans de multiples formulations), faisait proliférer

LES SEPT PRINCIPALES FAMILLES DE PLASTIQUES

Dans le paysage des plastiques, ces quelques familles sont surreprésentées pour raisons économiques. Elles interviennent dans la fabrication de nombreux contenants et emballages destinés à être en contact avec des aliments et des boissons.

les cellules cancéreuses de leur test de manière similaire à l'hormone naturelle 17β-œstradiol, et ce à des quantités auxquelles nous pouvons être exposés.

Un autre exemple bien connu est celui du bisphénol A, monomère utilisé pour fabriquer les plastiques en polycarbonate et reconnu comme perturbateur endocrinien – c'est-à-dire comme agent exogène qui perturbe le fonctionnement des hormones et induit des effets délétères sur un individu ou sa descendance. En France, jusqu'en 2010, il est entré dans la composition des biberons et, jusqu'en 2015, dans celle de nombreux contenants alimentaires, avant d'être interdit. Même si le bisphénol A n'est pas censé migrer du plastique vers le contenu, de faibles quantités non polymérisées sont susceptibles d'être libérées et absorbées. En 2017, l'Agence européenne des produits chimiques (Echa) a reconnu le bisphénol A comme substance très préoccupante, mais la plupart des pays européens l'utilisent encore.

Pour autant, les molécules de substitution promues – les bisphénols F et S – ne sont pas inertes. Cela est d'autant plus inquiétant que nous sommes tous exposés à ces molécules et imprégnés, comme l'a montré Santé publique France en 2019 avec l'étude Esteban. Menée sur 897 adultes et 500 enfants de France continentale, cette étude a révélé la présence de bisphénols A, S et F chez la quasi-totalité des personnes de la cohorte.

D'autres molécules particulièrement préoccupantes sont les phtalates, utilisés comme plastifiants pour assouplir les plastiques ou les rendre non coupants. Ces molécules ne sont

EN CHIFFRES

4,9 milliards de tonnes

Sur les 8,3 milliards de tonnes de plastiques produites entre 1950 et 2015, 4,9 milliards de tonnes, soit 60 %, n'ont été ni recyclées ni incinérées et se sont accumulées dans la nature. Ces déchets plastiques pourraient atteindre 12 milliards de tonnes en 2050.

640 000 à 1 500 000

C'est le nombre de microfibrilles plastiques libérées durant le lavage en machine de 1 kilogramme de vêtements synthétiques, selon les caractéristiques du textile lavé. La majorité de ces microfibrilles sont assez petites pour traverser les filtres des stations d'épuration.

12 000

Environ 12 000 additifs intervenant dans la composition de contenants en plastique et entre 30 000 et 100 000 substances ajoutées non intentionnellement sont susceptibles de migrer vers des aliments par contact.

Sources des chiffres : R. Geyer *et al.*, *Science Advances*, vol. 3, e1700782, 2017 ; F. De Falco *et al.*, *Sci. Rep.*, vol. 9, 6633, 2019 ; J. Muncke *et al.*, *Environ. Health*, vol. 19, 25, 2020.

pas liées de manière covalente aux plastiques et diverses études ont montré que certains composés à courte chaîne (le diéthylhexylphthalate ou DEHP, notamment) peuvent empêcher l'action des hormones masculines et perturber le fonctionnement des hormones thyroïdiennes. Or leurs métabolites ont été détectés dans 80 à 99 % des échantillons d'adultes et d'enfants de l'étude Esteban, ainsi que chez 92 % à 98 % de la population générale des États-Unis, selon une autre étude menée en 2014 sur quelque 11 000 participants.

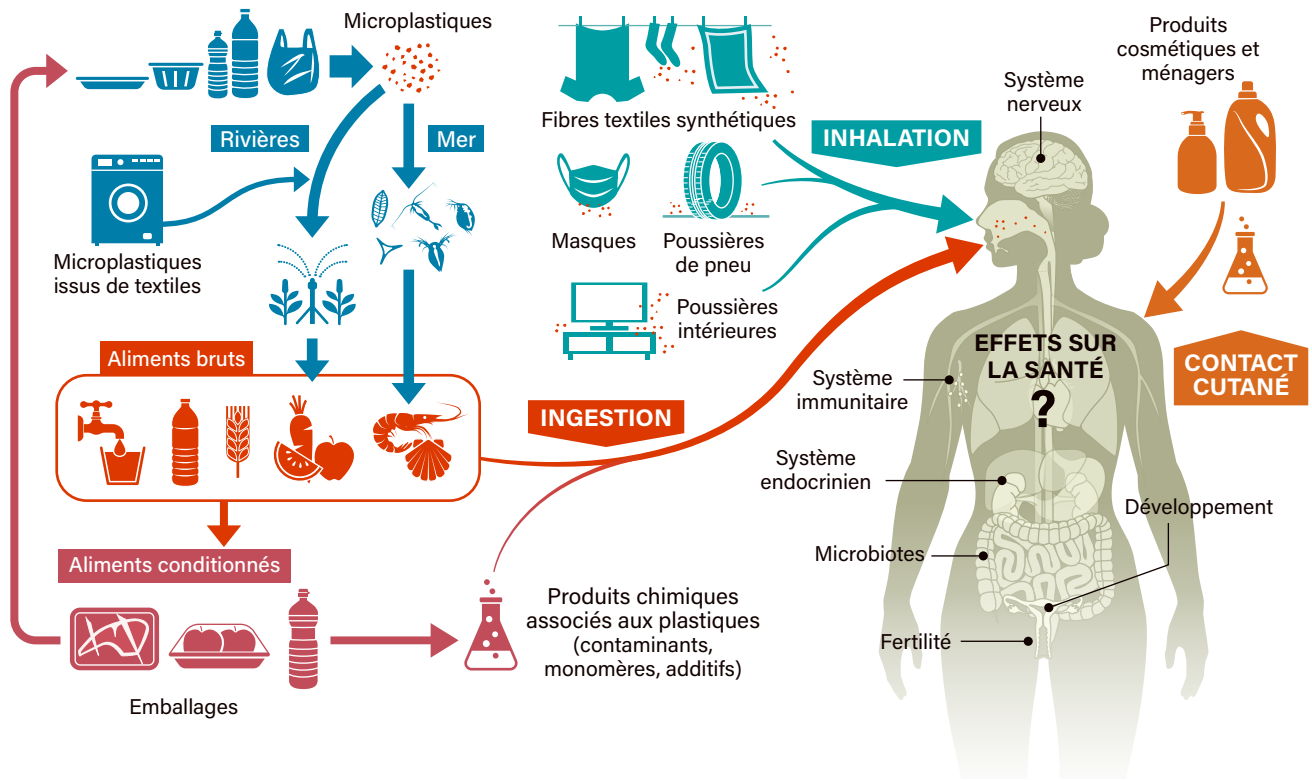
Ainsi, diverses molécules entrant dans la composition des plastiques sont susceptibles de s'en détacher et de prendre la place d'hormones naturelles ou de bloquer leurs actions. Mais la législation avance lentement. Pas simple en effet de démontrer l'effet délétère d'une substance contenue dans des plastiques, surtout s'il apparaît plusieurs décennies après l'exposition, par exemple quand celle-ci concerne de futurs parents durant la vie foetale de l'enfant ou même avant.

5300 FORMULATIONS DE POLYMÈRES

D'autant que le nombre de molécules autorisées pour la formulation des plastiques est vertigineux – et celui des formulations l'est tout autant ! Aujourd'hui, plus de 5300 formulations de polymères sont disponibles dans le commerce et plus de 4000 substances connues sont associées aux seuls emballages plastiques. Or selon une récente analyse de Jane Muncke, de la fondation suisse Food Packaging Forum, et ses collègues, environ 12000 substances sont

Les principales catégories d'additifs entrant dans la composition des plastiques

Catégories	Exemples de substances	Informations supplémentaires
Plastifiants	Phtalates, paraffines chlorées	Environ 80 % sont utilisés dans les plastiques en PVC, 20 % dans ceux en cellulose.
Retardateurs de flamme	Paraffines chlorées, tétrabromobisphénol A	
Antioxydants et stabilisants aux UV	Bisphénol A, composés en cadmium et en plomb, phénols, phosphites	Leur quantité dépend de leur structure et de celle du polymère plastique.
Stabilisants thermiques	Composés en cadmium et en plomb, nonylphénol	Utilisés principalement dans le PVC
Biocides	Composés à l'arsenic, triclosan	Utilisés principalement dans le PVC mou et les mousses de polyuréthanes
Pigments	Composés de cadmium, chrome, plomb, dioxyde de titan	
Solvants, catalyseurs	Antimoine dans le PET	Permettent la production



susceptibles d'être ajoutées intentionnellement. Et on estime que dix fois plus de Nias peuvent migrer dans les aliments à partir de divers articles en contact avec eux. Mais la plupart de ces contaminants restent inconnus, faute de méthodes d'analyse chimique appropriées. À titre de comparaison, environ 1000 pesticides sont en usage commercial actuellement, et des méthodes d'analyse chimique sont disponibles pour tous ces pesticides, y compris leurs principaux métabolites.

Cette complexité chimique remet en question les approches actuelles d'évaluation de la sécurité des plastiques, notamment en ce qui concerne les matériaux en contact avec les aliments. Alors que les risques liés aux substances principales et aux additifs sont évalués avant l'autorisation de la mise en contact avec des aliments, cette approche ne tient compte ni des Nias ni des effets synergiques potentiels de mélanges. Pour remédier à ces difficultés, deux pistes sont explorées. La première est la recherche d'autres solutions plus sûres. Les bioplastiques ? À première vue, ils semblent la solution idéale, conciliant l'utilisation d'un matériau bon marché et polyvalent et la conservation d'un environnement sans plastique apparent. Mais la réalité est tout autre.

L'ILLUSION DES BIOPLASTIQUES

Le terme « bioplastique » est ambigu, car il désigne à la fois des matériaux fabriqués à partir de matières premières renouvelables biosourcées, comme le biopolyéthylène, mais

aussi des matériaux biodégradables (comme le polysuccinate de butylène), ou les deux (par exemple l'acide polylactique ou PLA). Il n'est pas encore clair si ces matériaux et d'autres à base de plantes qui sont souvent mélangés à des matériaux synthétiques (les matériaux à base d'amidon, de cellulose ou de bambou, par exemple) relèvent de la définition des bioplastiques. Une chose est sûre : l'étanchéité ou la résistance des produits est acquise dans la plus grande majorité des cas grâce à un film plastique (*liner*) ou à l'ajout de polymère plastique dans la masse. Dans tous les cas, ils sont produits pour remplir la même fonction que les matières plastiques et apparaissent aux yeux du consommateur, faussement pour la plupart, comme des substituts pertinents, car plus « naturels ».

Souvent, les industriels commercialisant les bioplastiques mettent en avant leur biodégradabilité et leur inertie vis-à-vis de la santé. Cependant, peu de preuves scientifiques soutiennent cette notion. Par exemple, certains plastiques dits « biodégradables » ne se dégradent pas dans des milieux naturels, le cycle de recyclage exigeant un environnement industriel avec des températures supérieures à 70 °C. De plus, lors de l'évaluation et de l'amélioration de la performance environnementale des bioplastiques et des alternatives plastiques, l'accent est mis soit sur la phase de production (l'empreinte carbone, les matières premières renouvelables...), soit sur la fin de vie (la dégradabilité). L'exposition humaine

Notre organisme est en contact avec des microplastiques et des substances chimiques associées aux plastiques (additifs, monomères, contaminants) de multiples façons. Une bouteille d'huile de tournesol, par exemple, contient de l'huile produite à partir de plantes arrosées avec de l'eau contaminée en microparticules issues des déchets plastiques et des lavages de textiles synthétiques. On ingère donc à la fois ces particules, mais aussi les substances associées au plastique de la bouteille et qui ont diffusé dans l'huile. Avec quels effets sur la santé, sachant que plusieurs substances sont déjà connues indépendamment pour perturber certaines fonctions ?

aux produits chimiques est souvent négligée. Aussi sait-on très peu de choses en termes de sécurité chimique des bioplastiques, c'est-à-dire sur l'identité des composés présents dans le matériau et leur toxicité, ainsi que sur l'exposition humaine à ces composés. Ces lacunes sont problématiques, car l'exposition humaine aux substances provenant des bioplastiques et des matériaux d'origine végétale va augmenter avec leur utilisation croissante.

Enfin, comme les plastiques classiques, les plastiques biosourcés ou dits « biodégradables » peuvent contenir des monomères non polymérisés, des additifs et des Nias. Pire, les additifs sont même particulièrement importants pour les polymères extraits de ressources naturelles, comme l'amidon et la cellulose type boîte d'œufs, ou de microorganismes, comme le PLA, car leurs propriétés physiques – résistance thermique, propriétés de barrière... – sont limitées. Et comme la plupart de ces composés ne sont pas liés de manière covalente au polymère, ils peuvent aussi être transférés dans l'air, les solides et les liquides.

En 2020, une équipe autour de Martin Wagner, de l'université norvégienne de Sciences et de Technologie, a évalué la toxicité d'une vingtaine de bioplastiques (dont certains à base de bambou ou de cellulose) selon une méthodologie similaire à celle qu'elle avait utilisée un an plus tôt pour les plastiques

classiques. Après avoir découpé une partie des contenants alimentaires en bioplastique, les chercheurs en ont extrait le maximum de composés à l'aide de solvants, puis ont évalué par spectrométrie de masse le nombre de molécules transférées du plastique vers le solvant. Ils ont ensuite analysé sur des cellules leur toxicité et leurs effets hormonaux.

Ils ont ainsi montré que des milliers de substances (connues et non connues) composaient ces bioplastiques et que les trois quarts de ces bioplastiques étaient toxiques ou perturbaient les gènes impliqués dans la réponse aux hormones (leur étude sur les plastiques conventionnels avait montré des résultats similaires). Cette étude offre donc l'avantage de montrer que la plupart des bioplastiques sont à considérer comme des plastiques classiques, mais le fait d'avoir utilisé des solvants est discutable, car d'un usage peu réaliste. Mais de nouvelles approches devraient bientôt permettre d'évaluer les effets biologiques de molécules migrant réellement dans les aliments (voir l'encadré page 58).

Ainsi, comme les plastiques, la plupart des bioplastiques sont une source majeure d'exposition humaine à de multiples composés entrant dans leur fabrication. Et les écosystèmes terrestres et aquatiques ne sont pas mieux préservés



TRIBUNES DU MUSÉUM

JEAN-BAPTISTE FINI interviendra le samedi 3 juillet après-midi lors de la Tribune **Plastiques : l'overdose ?** du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Événement gratuit, informations sur mnhn.fr/tribunes-plastiques

MICROPLASTIQUES, NANOPLASTIQUES ET SANTÉ

Omniprésents dans l'environnement, les microplastiques et nanoplastiques proviennent principalement de la dégradation des plastiques à usage unique, des engins de pêche, des vêtements et des cosmétiques, des peintures, des pneus et de la poussière urbaine. En raison de leur faible densité, une part importante se retrouve dans les rivières et la mer. Leur présence dans la nature entraîne une accumulation au sein des organismes et, par conséquent, dans les chaînes trophiques, dont la chaîne alimentaire humaine. C'est un sujet de préoccupation majeur en raison des effets possibles sur la santé et l'environnement.

La problématique est double. D'une part, quels sont les effets sur les organismes ? Si au-delà de 10 micromètres, le risque que les particules de plastique pénètrent dans les cellules est faible, celles de taille inférieure à 10 micromètres sont susceptibles d'y entrer par divers mécanismes (phagocytose, endocytose...). D'autre part, ces particules aggravent-elles l'exposition aux substances qui composent les plastiques ? Rien ne permet d'éliminer cette possibilité. Le dioxyde de titane, par exemple, est très utilisé dans la fabrication

de plastiques pour sa pigmentation blanche et sa résistance. Or il se présente lui-même sous la forme de particules de quelques dizaines à plusieurs centaines de nanomètres dont diverses études suggèrent qu'elles pourraient perturber le fonctionnement des cellules. Quel effet a-t-il lorsqu'il est encore associé aux microplastiques ?

Ces questions sont largement débattues actuellement, à commencer par leur prérequis : quelle est notre exposition ? La réponse est loin d'être claire. Une abondante littérature existe sur la présence des microplastiques dans les aliments, s'appuyant sur un large éventail de méthodes pour isoler, compter et analyser ces particules dans les différents aliments, ce qui complique l'estimation. En 2020, en compilant les données de telles études, Juan Conesa et Maria Iñiguez, de l'université d'Alicante, en Espagne, ont ainsi évalué qu'un humain ingère en se nourrissant 22 à 37 milligrammes de microplastiques par an. Mais de leur côté, Kala Senathirajah, de l'université de Newcastle, en Australie, et ses collègues ont estimé, à partir de 59 publications mesurant la quantité de microplastiques



présents dans la nourriture, les boissons, l'eau et l'atmosphère, qu'une personne en ingère entre 0,1 et 5 grammes (l'équivalent d'une carte bancaire) par semaine. Et encore tout récemment, l'équipe d'Albert Koelmans, à l'université de Wageningen, aux Pays-Bas, a estimé par modélisation qu'en moyenne, via l'air ou la nourriture, un adulte est exposé à 0,2 milligramme de microplastiques par an, soit bien moins que dans les deux autres études.

Quant aux nanoplastiques, encore peu d'études ont évalué leur présence dans la chaîne alimentaire humaine, probablement du fait de l'absence de méthodologies validées et standardisées.

J.-B. F.

pour autant, car ces matériaux se désagrègent plus facilement en microparticules.

La seconde piste pour limiter les risques des plastiques et de leurs composés est d'envisager de nouvelles méthodologies pour évaluer leurs effets en amont et de modifier en conséquence les réglementations sur les plastiques. Lorsque ces dernières, et en particulier celles sur les produits en contact avec les aliments, ont été mises en place dans les années 1970, on admettait généralement que les expositions chimiques de faible niveau, c'est-à-dire inférieures à la dose sans effet toxicologique établi, présentaient des risques négligeables pour les consommateurs. Toutefois, des études plus récentes ont montré que cette hypothèse n'est pas valide dans tous les cas : l'exposition à de faibles concentrations suffit parfois à perturber le système endocrinien et induire des effets néfastes sur la santé.

Par exemple, en recherchant une trentaine de molécules connues pour être des perturbateurs endocriniens ou suspectées de l'être (phtalates, bisphénol A, perfluorés...) dans les urines de la cohorte Selma, rassemblant plus de 1800 paires mère-enfant, nous avons établi, au sein d'une collaboration internationale, une corrélation entre l'exposition *in utero* à un mélange de 11 molécules et un retard de langage des enfants à 3 ans. Nous avons aussi validé chez la grenouille et le poisson-zèbre que ce mélange perturbe plusieurs axes hormonaux, notamment les hormones thyroïdiennes et de la reproduction. Or, *a priori* (le doute est permis concernant les perfluorés), les substances du mélange étaient présentes à des doses inférieures aux doses réglementaires dans l'environnement des femmes étudiées. Surtout, cette étude montre que l'évaluation du risque actuellement fondée sur une évaluation individuelle

des molécules n'est pas du tout adaptée à la réalité de l'exposition aux mélanges.

Il est donc légitime de s'interroger sur la pertinence de la réglementation actuelle et des méthodes employées. Pour la grande majorité des plastiques, cosmétiques, pesticides, seules les molécules majoritaires entrant dans leurs formulations sont testées. Pour les plastiques, la plupart du temps, seul le monomère est mesuré (styrène dans le polystyrène, le propylène dans le polypropylène, etc.).

UNE RÉGLEMENTATION INAPPROPRIÉE

Le règlement européen (CE n°1935/2004) préconise que les substances cédées par les matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires ne doivent pas entraîner de modifications inacceptables de la composition des denrées. Les bonnes pratiques de fabrication permettent de produire des matériaux en matière plastique qui ne cèdent pas plus de 10 milligrammes de substances par décimètre carré de surface du matériau. Cette limite de migration globale correspond, pour un emballage cubique contenant 1 kilogramme de denrées alimentaires, à une migration de 60 milligrammes.

Or ce règlement et les normes sont fondées sur les niveaux de seuil des molécules simples utilisées pour fabriquer les contenants et ne prennent en considération ni l'âge d'exposition ni les effets à faibles doses des molécules, ni le fait que nous sommes exposés à un mélange de molécules. Ainsi, des substances interdites pour certains usages peuvent être autorisées dans les plastiques en contact avec les aliments si leur migration dans ces derniers est inférieure à la limite de détection de 10 microgrammes par kilogramme d'aliments, et s'ils ne sont pas

COMMENT LIMITER NOTRE EXPOSITION AUX PLASTIQUES OU À LEURS ADDITIFS

- > Ne pas réchauffer les aliments au four à microondes dans des barquettes ou poches en plastique. Les transvaser dans des récipients en verre.
- > Ne pas réutiliser des bouteilles plastiques pour le stockage de l'eau.
- > Limiter le stockage des aliments dans des contenants en plastique, même à froid.
- > Limiter l'usage de film alimentaire, surtout lorsqu'il est en contact direct avec les aliments. Préférer les films en tissu ciré.
- > Manger dans des contenants inertes.
- > Aérer.

QUELLES BARQUETTES POUR LA CANTINE DES ÉCOLES ?

Adoptée en novembre 2018, la loi Egalim interdira dès 2025 l'usage de contenants en plastique dans la restauration collective accueillant des enfants. Les contenants en acier inoxydable et en verre utilisés historiquement étant lourds et leur système de nettoyage encombrant, de nombreuses communes ont orienté leur choix vers des contenants en bioplastique à base de cellulose, légers et jetables, ou pourraient le faire. Or aucune norme n'oblige à évaluer les effets de la formulation complète de ces barquettes alimentaires sur la santé. Cela est d'autant plus vrai pour les composés néoformés lors du réchauffage des aliments. De plus, si les effets biologiques, dont la

perturbation hormonale, ont été parfois évalués, ils n'étaient effectués que sur des fragments de barquettes dissous et sur des modèles cellulaires.

Avec des collègues du CNRS, du Muséum national d'histoire naturelle, de l'Inserm, de l'Inrae et deux partenaires industriels, le Laboratoire national de métrologie et le laboratoire WatchFrog, nous avons lancé le projet *PoLySafe*, dont l'objet est d'évaluer l'inertie de ces contenants alimentaires dans leur globalité. Il s'agira de mettre des contenants alimentaires en polypropylène, cellulose, acier inoxydable et en verre en présence de substances simulant deux types d'aliments (des solutions acide ou lipidique) avec un temps de contact

déterminé et à une température représentative des conditions réelles d'utilisation. Nous obtiendrons ainsi des extraits dans lesquels des dizaines (voire des centaines ?) de substances auront diffusé. Nous testerons ces extraits sur des cellules humaines et des modèles aquatiques (xénope, poisson-zèbre...) afin d'évaluer l'activité biologique de ces mélanges de molécules, ce qui nous permettra de mesurer les risques sur le métabolisme, les perturbations thyroïdiennes, œstrogéniques et androgéniques (hormones sexuelles féminines et masculines, respectivement). Nous obtiendrons nos premiers résultats début 2022.

J.-B. F.

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.