

Micro-plastiques et micro-organismes

Séance du 29 septembre 2021

Nous utilisons tous quotidiennement des matières plastiques et en conséquence nous sommes tous producteurs de déchets plastiques ; nous voyons, habitués et/ou exaspérés, des déchets plastiques abandonnés en ville, à la campagne ou en bord de mer ; nous sommes dérangés voire révoltés par les images chocs de tortues marines prises dans des déchets plastiques, sacs ou filets abandonnés, ou encore de contenus gastriques d'animaux marins, d'oiseaux par exemple, incluant des morceaux de plastique multicolores ; et nous entendons que ces déchets s'accumulent dans certaines zones océaniques au point de former un hypothétique 7^{ème} continent constitué de débris plastiques dénommés micro-plastiques. Mais ces conséquences regrettables de nos négligences collectives sont largement imperceptibles et nous pouvons espérer qu'elles disparaissent grâce à l'action des efficaces et discrets recycleurs de la nature que sont les communautés microbiennes.

Mais qu'en est-il exactement ? Comment ces déchets plastiques interagissent-ils avec les communautés microbiennes ? Les matières plastiques sont-elles colonisées et dégradées par les micro-organismes ? Les micro-organismes sont-ils porteurs de solutions pour lutter contre cette forme de pollution ?

Les sections 5 « Interactions Milieux-Êtres Vivants » et 6 « Sciences de la vie » ont organisé la séance « Micro-plastiques et micro-organismes » afin d'apporter des réponses à ces questions.

INTRODUCTION

Georges **BARBIER**¹

Les informations suivantes sur l'état des lieux de la production de matières plastiques et sur la pollution massive induite sont extraites de deux rapports de synthèse diffusés récemment par l'Académie des Sciences (Les plastiques dans l'environnement) et l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (Pollution plastique : une bombe à retardement ?) :

- Les matières plastiques dont les propriétés uniques (légers ; stables ; rigides, souples ou élastiques ; isolants ; résistants aux chocs et à la corrosion, etc.) ont fait le succès, sont devenues le troisième matériau le plus fabriqué après le ciment et l'acier.
- La production annuelle mondiale de matières plastiques connaît une croissance continue ; elle est passée de 2 millions de tonnes en 1950 à environ 400 millions de tonnes aujourd'hui et plus de la moitié des plastiques produits sur la planète l'ont été depuis 2000.
- Les matières plastiques sont faiblement recyclées et par conséquent les 4/5 de la production sont devenus des déchets au bout d'une année ; il s'avère qu'une grande part de ces produits pollue les milieux continentaux et marins. On estime que l'ordre de grandeur des déchets plastiques qui rejoignent l'océan est de 10 millions de tonnes par an.

¹ Membre correspondant de la section 5 de l'Académie d'Agriculture de France.

- Dans l'environnement, le fractionnement mécanique et physico-chimique et aussi biologique des déchets plastiques produit des fragments de tailles décroissante au cours du temps : on parle généralement de macro-débris pour les particules de taille supérieure à 5mm, de micro-plastiques pour les particules de taille inférieure à 5 mm, et de nano-plastiques pour les particules de taille inférieure à 1mm. Il en résulte qu'une part de la pollution plastique difficile à estimer devient ainsi invisible au cours du temps car de taille microscopique.
- L'accumulation dans les océans produit des effets délétères pour les animaux marins et induit un risque d'accumulation des nanoparticules et produits de dégradation le long des chaînes trophiques, risque très mal caractérisé à l'heure actuelle.

En réponse au constat de pollution massive par les matières plastiques différentes, des recommandations ont été formulées et certaines impliquent l'intervention des micro-organismes et par conséquent concernent les microbiologistes :

- Développer la production de polymères biodégradables à faible impact environnemental
- Conduire des recherches pour comprendre le cycle biogéochimique des déchets plastiques dans l'environnement
- Evaluer l'impact des déchets plastiques de différentes tailles sur la faune et sur la santé des êtres humains (microbiotes inclus)

Les intervenants suivants ont été sollicités pour nous faire part de leurs connaissances sur le thème « Micro-plastiques et micro-organismes » :

- François Galgani, responsable de projet à l'Ifremer, a présenté le cycle du plastique dans les océans, les interactions avec le monde vivant et les politiques de gestion.
- Matthias Rillig, Professeur à l'Université Libre de Berlin, a présenté les micro-plastiques dans les écosystèmes terrestres et le sol.
- Jean-François Ghiglione, directeur de recherches CNRS à l'Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer, a répondu à la question suivante : Biodégradation des plastiques en mer : mythe ou réalité ?
- Stéphane Bruzaud, professeur à l'Université de Bretagne Sud à Lorient, est intervenu sur le thème des polymères biosourcés et/ou biodégradables en focalisant sur les polyhydroxyalcanoates bactériens.

Enfin, Philippe Potin, membre de la section 6 de l'Académie d'Agriculture de France a conclu la séance².

² Cette séance a également bénéficié des contributions de Jean-Charles MUNCH, Christian MOUGIN et Guilhem BOURRIÉ pour la section 5 ainsi que Serge POULET et Agnès RICOCH pour la section 6.

CYCLE DU PLASTIQUE DANS LES OCÉANS, INTERACTIONS AVEC LE MONDE VIVANT ET POLITIQUES DE GESTION

François **GALGANI**³

L'apport de pollutions plastiques au milieu marin présente de fortes variations selon les zones géographiques et l'Asie du Sud Est est une région où l'apport de déchets au milieu marin est particulièrement élevé. Plus de 95% de ces déchets reposent sur les fonds marins et corrélativement la teneur en micro-plastiques des sédiments marins s'accroît. Les apports au milieu marin se caractérisent par la diversité des sources localisées et diffuses : fleuves (apports de macro-déchets estimés à 3500 tonnes/an en Europe), ruissellement, transport maritime, pêche, tourisme, apports atmosphériques de micro-plastiques. Les micro-plastiques représentent environ 90% du nombre des objets plastiques présents mais seulement 10% de leur poids. Les principaux impacts environnementaux des déchets plastiques sont les emmêlements, majoritairement dans les engins de pêche et les ingestions de particules plastiques pour les animaux marins ainsi que le transport d'espèces sur les objets et particules flottants. Il n'existe pas de solution unique mais un ensemble d'orientations possibles pour progresser dans la lutte contre la pollution par les matières plastiques : le développement du recyclage, la collecte et le traitement des déchets, le développement de nouveaux matériaux plus durables, le nettoyage des zones souillées, l'éducation et l'information des citoyens, etc. A cet égard il convient de saluer particulièrement les initiatives prises dans le cadre des programmes et conventions internationaux (PNUE, BlueMed, Barcelone, OSPAR) ainsi que la forte implication de la Commission Européenne. Précisons enfin que les continents de plastique n'existent pas mais que les gires océaniques accumulent des concentrations accrues de particules de matières plastiques, que les déchets plastiques impactent négativement les espèces marines mais ne contribuent pas aux transferts trophiques au sein des chaînes alimentaires, que le devenir des nano-plastiques est inconnu, que du fait de la forte dilution, les matières plastiques sont une voie mineure de contamination chimique en milieu marin, et que les interactions entre les espèces et le plastique et en particulier le transport d'espèces opéré par les supports flottants sont très mal connus.

LES MICROPLASTIQUES DANS LES ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES ET LE SOL

Matthias **RILLIG**⁴

La perception par le public des conséquences des déchets plastiques sur l'environnement reste très centrée sur le milieu marin car l'impact sur le sol est moins perceptible puisque moins visible. Les micro-plastiques arrivent dans l'environnement par fractionnement ou du fait de leur production initiale et de leur utilisation à cette taille, par exemple dans les produits cosmétiques. De multiples voies d'entrée de micro-plastiques dans le sol existent : dépôts aériens, fragmentation de déchets plastiques jetés, paillage en plastique et autres produits agricoles, apports de compost et de boues d'épuration, et enfin abrasion routière des pneus qui constitue probablement l'un des apports dominants vers les écosystèmes terrestres. Les micro-plastiques arrivés à la surface du sol sont incorporés et dispersés en quelques jours

3 Responsable de projet à l'Ifremer et membre du comité de pilotage de la Mission OCEANS/STARFISH de la commission Européenne, éditeur en chef de la revue Marine Pollution Bulletin

4 Professeur à l'Université Libre de Berlin, Freie Universität Berlin, Directeur de l'Institut de Recherche Avancée sur la Biodiversité de Berlin Brandebourg, membre de l'Académie Nationale des Sciences Allemande Leopoldina

dans le sol par les vers de terre et les collemboles, entre autres, auxquels s'ajoutent les effets du travail du sol, des canaux racinaires et de la circulation de l'eau. L'impact sur le sol peut être envisagé selon deux points de vue, d'une part en tant que polluant induisant une toxicité et d'autre part en tant que facteur de changement global. Au cours du temps, la dégradation des matières plastiques produit des nano-plastiques et libère des additifs dont les effets toxiques sont avérés. Par conséquent, un pic de toxicité résultant de la dégradation des matières plastiques qui ont été dispersées dans l'environnement pourrait survenir dans le futur. L'étude de l'effet des micro-plastiques en tant que facteur de changement global révèle un important effet négatif des matériaux fibreux sur la formation d'agrégats, donc sur la structuration des sols. Plus la forme des micro-plastiques diffère des formes de particules naturellement présentes dans les sols (films, fibres) plus l'effet négatif sur la structure du sol est important. Si la structure du sol est dégradée par certains micro-plastiques, alors la capacité de rétention d'eau et la croissance des plantes seront aussi impactées négativement. Les expériences de laboratoire ont montré des effets neutres ou positifs des micro-plastiques sur la croissance de plantes en pots ainsi que des effets positifs sur les micro-organismes colonisant les racines mais aussi des effets négatifs des particules d'usure des pneus. L'étude au laboratoire de l'effet des micro-plastiques sur la croissance de communautés végétales (mélange de 6-7 espèces en pots sous serre), montre un effet positif sur la biomasse mais une modification de la structure de la communauté (changement de la distribution des biomasses des différentes espèces). Sachant les énormes quantités de matières plastiques dispersées dans l'environnement, ces effets observés au laboratoire interrogent quant à l'impact global à l'échelle de la planète. Les micro-plastiques ne sont en fait que l'un des facteurs de changement global, facteurs que la plupart des auteurs étudient séparément. L'étude des effets simultanés de 10 facteurs de changement global (sécheresse, apport d'azote, micro-plastiques, température, glyphosate, antibiotiques, fongicide, cuivre, salinité, insecticide) montre que plus les facteurs appliqués simultanément sont nombreux, plus les fonctions (stabilité des agrégats, vitesse de pénétration de l'eau, taux de décomposition, respiration) et la biodiversité du sol décroissent. Ces décroissances observées dépendent moins de la nature des facteurs appliqués simultanément (micro-plastiques inclus) que de leur nombre. Les micro-plastiques constituent donc un facteur de changement global supplémentaire et pas seulement un problème éco-toxicologique, avec des effets sur les propriétés du sol, la croissance des plantes, la composition des communautés végétales et microbiennes, le fonctionnement des écosystèmes. Nous commençons seulement à comprendre les effets des micro-plastiques dans les sols et des inconnues majeures demeurent dont les effets à long terme, la prise en compte de la diversité des micro-plastiques, les interactions avec les autres facteurs.

BIODÉGRADATION DES PLASTIQUES EN MER : MYTHE OU RÉALITÉ ?

Jean-François **GHIGLIONE**⁵

En milieu marin, les particules de matières plastiques sont rapidement couvertes par des biofilms microbiens. L'étude des microorganismes présents au niveau de ces biofilms et de leurs fonctions repose la collecte d'échantillons lors de campagnes océanographiques qui ont

⁵ Directeur de recherches CNRS au Laboratoire d'Océanographie microbienne (LOMIC), Observatoire Océanologique de Banyuls-sur-Mer, membre du conseil scientifique de l'IFREMER, co-fondateur du GDR Polymères et Océans et du réseau international d'écotoxicologie microbienne (EcotoxicoMic)

été organisées depuis 2014 avec les ONG Tara Océan et Expédition 7^{ème} Continent dans différentes régions du monde. La filtration d'eau de mer avec un filet Manta permet alors de quantifier la charge en micro-plastiques des différentes zones étudiées (de 10 à 300 particules plastique pour 10 000 litres d'eau de mer filtrée) et aussi de caractériser les communautés colonisatrices que l'on appelle la plastisphère. Ces communautés sont abondantes et d'une grande biodiversité. Leur structure révèle une plastisphère différente des communautés de l'eau de mer environnante ou colonisatrices de particules de matières organiques. Un écosystème spécifique se développe donc en surface des particules plastiques associant des autotrophes, particulièrement des cyanobactéries, et des hétérotrophes, dont des hydrocarbonoclastes (capables de dégrader des hydrocarbures), ce qui conduit à présumer des capacités de dégradation des plastiques. Les images en microscopie électronique de surface des plastiques ont montré des incrustations de bactéries suggérant aussi des capacités de biodégradation. De nombreux travaux de laboratoire ont permis de montrer que des bactéries cultivées étaient capables de dégrader des plastiques de synthèse tel que le polyéthylène ou le PET (polytéréphtalate d'éthylène) ainsi que des plastiques biodégradables. L'étude des capacités de dégradation des bactéries cultivées est d'ailleurs porteuse d'innovation : l'enzyme PETase de l'espèce bactérienne *Idionella sakaiensis* commercialisée par société Carbios en constitue un exemple. Mais sachant que les bactéries cultivées représentent moins de 1% de la biodiversité des milieux naturels, l'enjeu est désormais de mettre en œuvre les technologies dites « omiques » (génomique, transcriptomique, protéomique) pour explorer les fonctions et voies de dégradation des diverses composantes microbiennes de la plastisphère. Un polymère biodégradable doit pouvoir être intégralement transformé en biomasse et en CO₂ en un temps donné. L'étude de la biodégradation des matières plastiques dans l'environnement est un processus complexe qui nécessite une approche pluridisciplinaire et le réseau national « Polymères et Océans » qui regroupe une cinquantaine de laboratoires et 250 chercheurs répond à cette nécessité. La démonstration de biodégradabilité d'une matière plastique biodégradable doit être faite pour le milieu marin et par conséquent les normes de biodégradabilité doivent intégrer des spécifications propres à cet environnement, ce qui n'est pas le cas actuellement. Certaines espèces bactériennes ont donc des capacités démontrées de dégrader certains plastiques ; mais à l'évidence, elles ne suffisent pas à résoudre l'énorme problème posé par la dispersion des déchets plastiques en milieu marin. Des progrès sont donc nécessaires pour développer l'utilisation de matériaux plastiques qui soient biodégradables en milieu marin. Cette « transition plastique » suppose l'accroissement des liens entre scientifiques, industriels et législateurs.

POLYMÈRES BIOSOURCÉS ET/OU BIODÉGRADABLES : DÉFINITIONS, ÉLÉMENTS DE CONTEXTE ET FOCUS SUR LES POLYHYDROXYALCANOATES

Stéphane **BRUZAUD**⁶

Le terme bioplastique est couramment utilisé pour qualifier des polymères biosourcés et donc produits à partir de biomasses, ou biodégradables ou encore à la fois biosourcés et biodégradables. Mais le cycle du carbone n'est bouclé rapidement qu'avec les bioplastiques biosourcés ET biodégradables (PLA = PolyLactic Acid, PHA = PolyHydroxyAlcanoates, PBS = PolyButylene Succinate et autres polymères à base d'amidon). La production de

⁶ Professeur à l'Université de Bretagne Sud à Lorient.

bioplastiques en 2020 est de l'ordre de 2 millions de tonnes dont 1,2 millions de tonnes sont biodégradables. Pour l'heure, la concurrence des bioplastiques vis-à-vis de la production d'aliments n'est pas à craindre car la part des surfaces cultivables qui leur est consacrée reste marginale (700 000 ha, soit 0,015%) et la tendance est à la production de bioplastiques de seconde génération à partir de bois et de coproduits de l'agriculture ainsi que de troisième génération par voie biotechnologique (micro-algues, bactéries, levures, moisissures) donc hors-sol. Les coûts de production des bioplastiques restent élevés et les impacts environnementaux doivent nécessairement être étudiés sur l'ensemble du cycle de vie. En effet l'étude de la biodégradabilité d'un polymère n'est absolument pas triviale et dépend de multiples facteurs intrinsèques (caractéristiques physico-chimiques) et extrinsèques (caractéristiques du milieu). Il en résulte que parmi les polymères considérés comme biodégradables certains le sont effectivement dans de nombreux milieux (amidon, cellulose, PHB = PolyHydroxyButyrate), alors que le PBS, par exemple, ne l'est que par digestion anaérobie.

Les PHA sont produits par fermentation bactérienne en conditions contrôlées. Il s'agit de substances de réserve thermoplastiques et biodégradables accumulées en grandes quantités sous forme de granules par certaines cellules bactériennes. La nature des PHA peut être modulée via le choix des substrats utilisés pour la culture, ce qui permet d'obtenir des bioplastiques de propriétés variables allant de matériaux rigides aux élastomères. En pratique la production de PHA s'effectue en soumettant les cellules d'espèces bactériennes sélectionnées à un stress trophique (carence en azote) en fin de phase exponentielle de croissance de façon à disposer d'une biomasse maximale. La récupération des granules doit bien sûr intervenir avant que les cellules bactériennes ne les hydrolysent, ce qui suppose un suivi précis des cultures. La modulation de composition des PHA permet d'obtenir des films plus ou moins transparents ou encore de faire varier la rugosité de surface et la dureté de microbilles. La biodégradation des PHA en environnement marin est spectaculaire mais variable en fonction de leur nature, ce qui permet d'espérer à terme d'être en mesure de prévoir la biodégradabilité en fonction de la structure des polymères. Malgré tous les efforts réalisés depuis de nombreuses années pour produire le plus efficacement possible des PHA, le prix de vente actuel par les producteurs industriels chinois, de l'ordre de 10 €/kg, reste élevé. Il en résulte que les débouchés devraient concerner prioritairement des secteurs à forte valeur ajoutée tels que les cosmétiques, le domaine biomédical ou encore l'impression 3D. Cependant, il est probable que l'arrivée de réglementations contraignantes pour l'usage des matières plastiques conventionnelles soit un facteur déterminant du développement de la production et de l'usage des bioplastiques parmi lesquels la part des PHA devrait connaître une croissance importante dans les prochaines années.

CONCLUSION

Philippe POTIN

Comme François GALGANI l'a montré, les océans sont le réceptacle d'une part importante des plastiques répandus dans l'environnement. Bien que l'origine terrestre soit prépondérante, les activités maritimes, dont la pêche et l'aquaculture, y contribuent aussi. Matthias RILLIG nous a montré l'importance à accorder aux sols qui sont souvent oubliés et il nous a révélé que l'accumulation de micro-plastiques pouvait y constituer une sorte de bombe à retardement d'un point de vue éco-toxicologique mais aussi par l'impact sur la structure et le

fonctionnement global des sols ainsi que sur la croissance et la diversité des plantes. Jean-François GHIGLIONE nous a montré que l'océan est le lieu de développement de la plastisphère et que l'application des technologies « omiques » à la compréhension de la biodégradation des matières plastiques pourrait s'avérer génératrice de solutions. Il nous a aussi démontré l'importance de la prise en compte des spécificités du milieu marin dans la définition des normes de biodégradabilité des plastiques. On peut donc attendre de grands progrès des travaux conduits dans le cadre du GDR « Polymères et Océans » ainsi qu'il l'a expliqué. Stéphane BRUZAUD nous a montré l'espoir que l'on pouvait placer dans les polyhydroxycarboxylates produits par voie biotechnologique pour revenir à une économie davantage circulaire. Ces exposés nous ont aussi permis de percevoir que le thème « Microplastiques et micro-organismes » correspond à un champ de recherche encore largement ouvert sur de nombreuses questions telles que l'impact des microplastiques et de la plastisphère sur les écosystèmes microbiens naturels, le rôle des communautés microbiennes sur le devenir des déchets plastiques, en particulier des nanoplastiques, l'importance possible de composantes non-étudiées telles que les communautés fongiques et archéennes.

Compte-tenu du positionnement thématique de notre Académie, rappelons que les matières plastiques ont fait leur apparition en agriculture il y a une cinquantaine d'années et que le Comité Français des Plastiques en Agriculture a pour mission de favoriser l'utilisation responsable des plastiques en agriculture, autrement dit de la plasticulture. Car l'utilisation de films de paillage en agriculture présente de nombreux avantages : pour la gestion de l'eau, l'optimisation de l'usage des fertilisants et des produits phytosanitaires, la propreté et la précocité des récoltes, etc. Ce secteur a d'ailleurs été le premier à introduire l'usage de plastiques biosourcés et biodégradables. Ainsi des films de paillage bio- ou oxo-dégradables sont aujourd'hui disponibles. Il est connu que l'agriculture bénéficie de molécules extraites d'algues stimulantes de la croissance des plantes ou encore stimulatrices de réactions de défense, mais il est moins connu que la valorisation des coproduits de l'exploitation des algues permet à la société ALGOPACK de produire des bioplastiques. La société anglaise NOTPLA produit des emballages alimentaires consommables à partir d'algues. Les ulves, algues révélatrices des pertes d'azote de l'agriculture par les marées vertes, peuvent être utilisées pour produire du bioplastique à base d'amidon ainsi que le pratique la société ERANOVA. Nous pouvons en conclure que la production de bioplastiques avec des ressources locales offre de nouvelles opportunités dont l'agriculture a tout intérêt à se saisir pour développer de pratiques toujours plus durables.