

Biodégradation des plastiques en mer

par Claire Dussud^{1,2} et Jean-François Ghiglione^{1,2}

1-CNRS, UMR 7621, Laboratoire d'Océanographie Microbienne, Observatoire Océanologique, F-66650 Banyuls/mer, France

2-Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7621, Laboratoire d'Océanographie Microbienne, Observatoire Océanologique, F-66650 Banyuls/mer, France

Mots clés : écotoxicologie microbienne, déchets en mer, bioremédiation, DCSMM.

Le devenir des déchets en mer est une préoccupation environnementale de premier ordre qui fait aujourd'hui partie de la définition du « bon état écologique » de la Directive Cadre Sur le Milieu Marin (DCSMM, descripteur n°10). En milieu marin, ces déchets sont composés de 40 à 80% de plastiques (Barnes *et al.*, 2009). Des travaux récents estiment à 5 250 milliards le nombre de particules plastiques qui flottent à la surface des mers et océans, équivalent à 268 940 tonnes de déchets (Eriksen *et al.*, 2014). La pollution par les déchets plastiques touche tous les océans, y compris les zones polaires. Il existe néanmoins des zones d'accumulation créées par des courants marins appelés gyres océaniques (Lebreton *et al.*, 2012). La plus connue est la zone d'accumulation dans le gyre du Pacifique Nord (« 7^{ème} continent de plastique » ou « grande zone d'ordure du Pacifique »), mais cet exemple n'est pas un cas isolé. Les modèles de circulations océaniques suggèrent des zones d'accumulations dans 4 autres gyres (Pacifique Sud, Atlantique Nord, Atlantique Sud et Océan Indien). La Méditerranée est également très polluée par les plastiques du fait de son caractère de mer semi-fermée, avec un taux de renouvellement des eaux de 90 ans alors que la persistance des plastiques est supérieure à 100 ans (Lebreton *et al.*, 2012). Les débris plastiques retrouvés à la surface de l'eau sont dominés par les particules de taille inférieure à 5mm, communément appelées des microplastiques (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012). Les microplastiques sont issus de la fragmentation des plastiques et sont également dispersés dans tous les Océans (Ivar do Sul *et al.*, 2014). Ces fragments sont très stables et peuvent parfois persister jusqu'à 1000 ans dans le milieu marin (Cózar *et al.*, 2014).

La présence de ces matériaux synthétiques dans le milieu naturel est relativement récente, puisque l'essor de l'industrie du plastique date des années 1970. Dans l'environnement, la pollution par les plastiques peut avoir plusieurs conséquences. Mise à part la pollution visuelle qu'ils engendrent, les plastiques touchent les organismes marins de manière directe ou indirecte à différents échelons de la chaîne alimentaire (Wright *et al.*, 2013).

Dans les zones d'accumulation, la concentration de microplastiques observée (de taille de 0,5 à 5mm) est comparable à celle du zooplancton (entre 0.005 mm et plus de 50 mm). La Méditerranée, par

exemple, présente des ratios microplastiques/zooplancton de 1/10 à 1/2 (Collignon *et al.*, 2012). Le risque pour les prédateurs du zooplancton (i.e. les poissons) d'ingérer du microplastique est donc considérable. Le temps de résidence du plastique dans de petits poissons pélagiques est évalué entre 1 jour et 1 an (Davidson & Asch, 2011). Les fragments de microplastiques ingérés sont retrouvés dans les déjections des animaux, ils peuvent couler avec les cadavres ou encore être transférés aux prédateurs et ainsi atteindre les échelons supérieurs de la chaîne alimentaire (Cózar *et al.*, 2014). Les plastiques sont également des vecteurs de composés toxiques qui se concentrent à leur surface et pourraient être bio-accumulés dans la chaîne alimentaire. Ces composés toxiques peuvent être directement présent dans la composition du plastique ou bien s'adsorber à leur surface. Dans le premier cas, il s'agit d'additifs (phtalates, biphényles) incorporés à certains plastiques pour augmenter leur résistance. Différents travaux ont montré que ces composés peuvent être toxiques pour certains animaux et l'homme (Lithner *et al.* 2011). D'autres composés toxiques (hydrocarbures, pesticides, DDT, PCB) peuvent s'adsorber sur les plastiques, ce qui est susceptible d'augmenter leur dispersion, leur persistance en mer et leur accumulation dans les échelons trophiques les plus élevés (Teuten *et al.*, 2009). Les effets désastreux de l'ingestion des débris de plastiques confondus avec des proies sont également bien documentés, avec des effets sur les systèmes digestifs des animaux tels que les poissons, les oiseaux, les tortues de mer et les mammifères marins pouvant entraîner leur mort (Andrady 2011). Ces débris sont également considérés comme vecteurs de dispersion d'algues toxiques (Masó *et al.* 2007) et de microorganismes pathogènes (Zettler *et al.*, 2011).

Plusieurs études se sont attachées à décrire les étapes physiques, chimiques et biologiques intervenant dans la décomposition du plastique (Andrady, 2011). La dégradation biologique est en majeure partie réalisée par les microorganismes (essentiellement les bactéries) (Shah *et al.*, 2008). Organismes les plus abondant dans les océans (~100 millions de bactéries et >500 espèces par litre d'eau de mer), ces microorganismes invisibles à l'œil nu ont des capacités métaboliques extrêmement variées. Dans leur milieu naturel, les bactéries jouent un rôle d'éboueur des océans (organismes saprophytes) puisqu'elles reminéralisent la moitié du carbone organique qui provient des déchets de la chaîne alimentaire. De nombreuses bactéries sont également spécialisées dans la dégradation des hydrocarbures (bactéries hydrocarbonoclastes), qui sont les composants majeurs des plastiques. La capacité de dégradation de différents types de plastiques par les bactéries a largement été abordée dans la littérature, montrant une vaste diversité de bactéries capables de les dégrader (voir par exemple la revue de Shah *et al.* 2008). On aperçoit ici l'enjeu environnemental des recherches actuelles visant à mieux caractériser la biodégradation des plastiques par les communautés bactériennes.

Les étapes de dégradation d'un plastique en mer

Un plastique qui arrive en mer va d'abord subir une dégradation abiotique. Des dégradations physiques (vagues, température et UVs) et chimiques (oxydation ou hydrolyse) vont contribuer à fragiliser les structures des polymères (Ipekoglu *et al.*, 2007) et réduire le plastique en morceaux de plus petite taille. La dégradation biologique intervient ensuite. Elle est composée de 4 étapes successives (Figure 1).

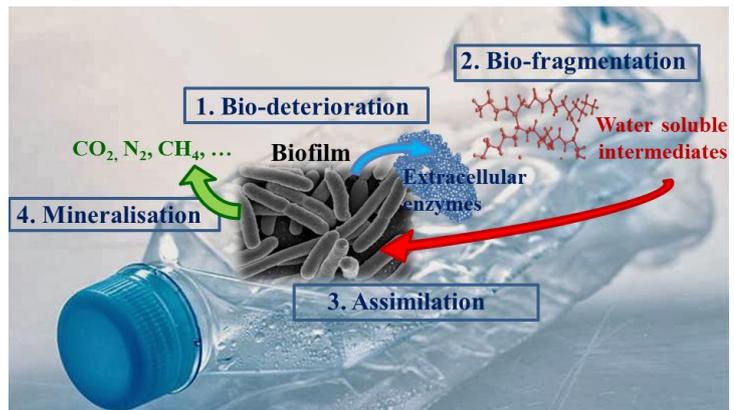


Figure 1 : Les différentes étapes de la biodégradation du plastique par les bactéries (inspiré de Shah *et al.*, 2008).

1. La bio-détérioration est engendrée par l'action mécanique du biofilm bactérien qui se forme à la surface du plastique (Figure 2) et qui va pouvoir agrandir les fissures déjà présentes (Bonhomme *et al.*, 2003). Une dégradation chimique peut également être orchestrée par la grande diversité des espèces présentes dans le biofilm, telle que la production de composés acides par les bactéries chimiolithotrophes et chimioorganotrophes.

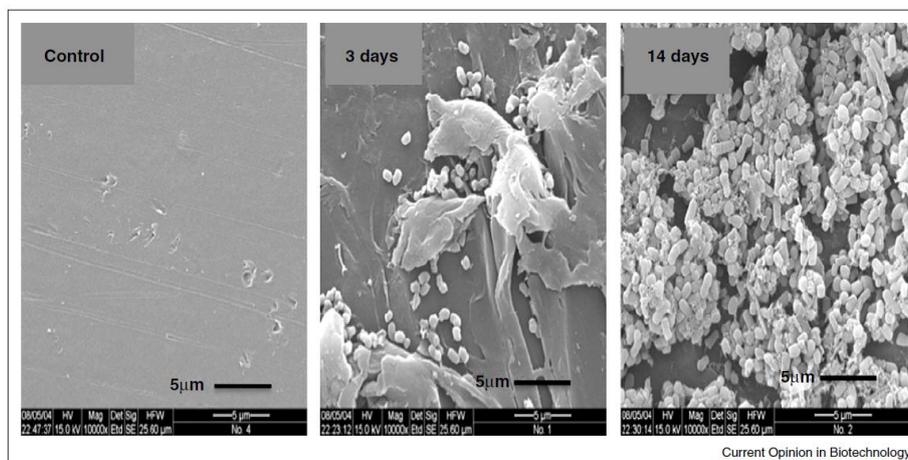


Figure 2 : Biofilm formé par *Rhodococcus ruber* C208 sur la surface de polyéthylène UV photo-oxydée, observé au microscope électronique à balayage. Initiation de la biodégradation détectée dans les 3 jours. Contrôle : Surface non inoculée (selon Sivan *et al.* 2011).

2. La bio-fragmentation est l'action d'enzymes bactériennes libérées à l'extérieur de leurs cellules pour cliver les polymères plastiques en oligomères et monomères. Les oxygénases, par exemple, rendent les polymères de plastique plus hydrosolubles et donc plus facilement dégradables par les bactéries. Les lipases et les estérases attaquent spécifiquement les groupes carboxyliques et les endopeptidases les groupements amines. Différentes espèces bactériennes sont impliquées dans ce processus (Ghosh *et al.* 2013).
3. L'assimilation consiste au transfert des molécules plastiques de taille <600Da dans les cellules bactériennes et à leur transformation en composés cellulaires et en biomasse.

4. La minéralisation correspond à la dégradation complète du plastique en molécules oxydées (CO₂, N₂, CH₄, H₂O).

Des études ont démontré que la souche *R. ruber* C208 incubée 30 jours sur du polyéthylène photo-oxydé (Figure 2) conduisait à la formation d'un biofilm et contribuait à la perte de 8% du poids sec de plastique (Sivan 2011). Si d'autres exemples de ce type ont été rapportés dans la littérature, ces observations reposent néanmoins sur des études en condition de laboratoire qui utilisent une seule espèce bactérienne. Or, le processus en milieu naturel est beaucoup plus complexe et fait intervenir de nombreuses espèces bactériennes. A notre connaissance, une seule étude a caractérisé les communautés bactériennes qui colonisent les plastiques avec les nouvelles approches de pyroséquençage haut-débit (Zettler *et al.* 2013), mais ces travaux ne donnent aucune indication sur leur capacité de dégradation des plastiques.

L'enjeu actuel des recherches dans ce domaine repose sur la meilleure compréhension des mécanismes de biodégradation des plastiques par les communautés naturelles. Quelles espèces colonisent les plastiques et lesquelles sont capables de les dégrader ? Les mécanismes moléculaires mis en jeu pour la dégradation sont-ils aussi différents que la grande variété de leur composition ? Actuellement, le programme national PlasticMicro coordonné par le Laboratoire d'Océanographie Microbienne de Banyuls (PI. JF Ghiglione) et financé par le CNRS tente de répondre à cette question. Une approche couplée de DNA-SIP et de pyroséquençage haut débit déjà utilisée pour identifier les bactéries capables de dégrader les hydrocarbures aromatiques polycycliques (Sauret *et al.* 2014) est proposée dans ce programme. Cette approche repose sur le marquage isotopique des plastiques et le suivi de leur incorporation par les bactéries pour accéder à la communauté fonctionnelle des « bactéries plasticlastes ». Ces travaux sont également mis en relation avec la récente expédition scientifique « Tara Méditerranée » coordonnée par l'Observatoire Océanologique de Villefranche (PI. G. Gorsky et M.L. Pedrotti) qui a récolté les microplastiques dans toute la Méditerranée.

Les plastiques biodégradables qui utilisent la biodégradation microbienne: une solution ?

La dégradation des plastiques conventionnels en mer est un processus très lent (>100 ans) qui conduit à leur accumulation dans les océans. Par exemple, on estime que la concentration de microplastiques en Méditerranée augmentera de 8% dans les 30 prochaines années (Lebreton *et al.*, 2012). De nouveaux plastiques dits « biodégradables » apparaissent sur le marché pour réduire l'impact des déchets plastiques en mer.

La définition d'un plastique biodégradable est donnée par la norme européenne EN 13432 de 2007 qui fixe la biodégradabilité à un seuil d'au moins 90% de dégradation en 6 mois maximum dans des conditions de compostage (environnement microbiologique actif dans des conditions particulières d'humidité et de température). Le résultat de cette dégradation est la formation de biomasse bactérienne ou sa minéralisation. Cette norme ne donne pas d'information sur la biodégradabilité dans des conditions environnementales et suggère une collecte des plastiques biodégradables. Sachant que les plastiques retrouvés en mer ont pour origine un manque de collecte, le fait de répondre à cette norme ne résout pas le problème des déchets plastiques en mer. Néanmoins, la recherche est l'innovation peuvent proposer et envisager d'autres solutions.

Les plastiques biodégradables sont de deux types :

-Les plastiques « hydro-biodégradables » ou « biosourcés » sont produit à partir d'amidon de maïs ou de pomme de terre. Si ce plastique répond à la norme EN 13432, sa dégradation dans l'environnement

reste sujette à controverse. D'autre part, il est entre 4 et 10 fois plus coûteux qu'un plastique classique et encourage l'agriculture intensive.

-Les plastiques « oxo-biodégradables » sont de même composition primaire que les plastiques conventionnels (polyéthylène, polypropylène, polystyrène,... même filières de production) auxquels ont été ajoutés des stabilisants qui permettent de prédire leur durée de vie et des pro-oxydants qui facilitent leur biodégradation par les microorganismes. Si la dégradation abiotique de ces plastiques est bien documentée, la démonstration de leur biodégradation reste un sujet d'équivoque dans le domaine. Néanmoins, les évolutions des formulations des additifs semblent prometteuses. Très récemment, l'additif « d2w » (<http://www.symphonyenvironmental.com/d2w/>) a obtenu un écolabel (365.001/14) décerné aux produits respectueux de l'environnement selon les normes ISO 14020:2002 et 14024:2004.

Conclusions

Différentes actions de recherches nationales et internationales ont été encouragées ces dernières années devant l'ampleur de la pollution par les plastiques en mer. La compréhension des mécanismes de biodégradation des plastiques en mer est à ses balbutiements. Si certains mécanismes ont été observés en condition de laboratoire, leur étude en milieu naturel reste largement inexplorée. Par exemple, les mécanismes moléculaires de bio-détérioration, bio-fragmentation, bio-assimilation et bio-minéralisation sont aujourd'hui inconnus. La diversité des microorganismes associés à ces différentes étapes de la biodégradation est également ignorée. La compréhension de ces processus permettra de mieux définir les taux de biodégradation des plastiques et de mieux prédire le devenir des plastiques dits « biodégradables » en mer.

La mer est le réceptacle ultime de tous les déchets produits sur terre (80% des déchets retrouvés en mer proviennent de la terre). La solution au problème de la pollution des plastiques en mer ne viendra certainement pas de la mer elle-même, mais d'une prise de conscience des citoyens qui sont responsables de cette pollution (plus de 30% des déchets plastiques retrouvés en mer proviennent d'un manque de collecte de la part des ménages).

La pollution par les plastiques en mer en quelques chiffres

225 millions tonnes de plastiques produits / an

0,1% de la production mondiale arrive en mer (**45 000 tonnes / an**)

5250 milliards de particules plastiques flottent dans les océans, équivalent à 268 940 tonnes

1 seconde pour fabriquer un sac plastique, **20 minutes** d'utilisation moyenne de ce sac,

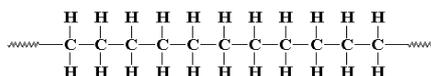
plus d'un siècle pour qu'il soit dégradé en milieu naturel

80% des déchets retrouvés en mer proviennent de la terre

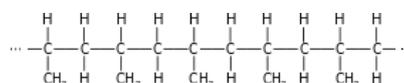
Plus de **30% des déchets plastiques** retrouvés en mer proviennent des ménages

Plastiques les plus retrouvés en mer

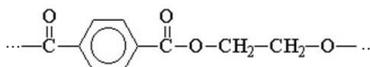
Polyéthylène (PE)



Polypropylène (PP)



Polytéréphtalate d'éthylène (PET)



Références :

- Andrady AL (2011). Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62: 1596-1605.
- Bonhomme S, Cuer A, Delort AM, Lemaire J, Sancelme M, Scott G (2003). Environmental biodegradation of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 81: 441-452.
- Barnes DK, Galgani F, Thompson RC and Barlaz M (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526): 1985-1998.
- Collignon A, Hecq JH, Glagani F, Voisin P, Collard F, Goffart A, (2012). Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. *Marine pollution bulletin*, 64(4): 861-864.
- Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo JL, Irigoien X, Úbeda B, Hernández-León S, Palma AT, Navarro S, de Lomas JG, Ruiz A, Fernández-de-Puelles ML, Duarte CM (2014). Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(28): 10239-10244.
- Davison P, Asch RG (2011). Plastic ingestion by mesopelagic fishes in the North Pacific Subtropical Gyre. *Marine Ecology Progress Series*, 432: 173-180.
- Eriksen M, Lebreton LC, Carson HS, Thiel M, Moore CJ, Borrerro JC, Reisser J (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS one*, 9(12): e111913.
- Ghosh SK, Pal S, Ray S (2013). Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environmental Science and Pollution Research* 20: 4339-4355.
- Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson RC, Thiel M (2012) Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. *Environ Sci Technol* 46(6): 3060–3075.
- Ipekoglu B, Böke H, Cizer O (2007). Assessment of material use in relation to climate in historical buildings. *Building and Environment*, 42: 970-978.
- Ivar do Sul JA, Costa MF (2014). The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution*, 185: 352-364.
- Lebreton LCM, Greer SD, Borrero JC (2012) Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Mar Pollut Bull* 64(3): 653–661.
- Lithner D, Larsson A, Dave G (2011). Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Sci. Total Environ.* 409: 3309e3324.

- Masó M, Garcés E, Pagès F, Camp J (2007) Drifting plastic debris as a potential vector for dispersing Harmful Algal Bloom (HAB) species. *Sci. Mar.* 67: 107–111.
- Sauret C, Severin T, Vétion G, Guigue C, Goutx M, Pujo-Pay M, Conan P, K Fagervold S, Ghiglione JF (2014) 'Rare biosphere' bacteria as key phenanthrene degraders in coastal seawaters. *Applied and Environmental Microbiology* 194: 246-253.
- Sivan A (2011). New perspectives in plastic biodegradation. *Current Opinion in Biotechnology*, 22: 422-426.
- Shah AA, Hasan F, Hameed A, Ahmed S (2008). Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology advances*, 26(3): 246-265.
- Teuten EL, Saquing JM, Knappe DRU, Barlaz MA, Jonsson S, Björn A, Rowland SJ, Thompson RC, Galloway TS, Yamashita R, Ochi D, Watanuki Y, Moore C, Viet PH, Tana TS, Prudente M, Boonyatumanond R, Zakaria MP, Akkhavong K, Ogata Y, Hirai H, Iwasa S, Mizukawa K, Hagino Y, Imamura A, Saha M, Takada H (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364: 2027e2045
- Wright SL, Thompson RC, Galloway TS (2013). The physical impacts of micro- plastics on marine organisms: a review. *Environ. Pollut.* 178: 483e492.
- Zettler ER, Mincer TJ, Amaral-Zettler LA (2013). Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science and Technology*, 47: 7137-7146.