

La dégradation des plastiques en mer

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

<https://www.sfecologie.org/regard/r63-plastiques-en-mer-dussud-et-ghiglione/>

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, écosystèmes marins, déchets, réseaux trophiques, bioaccumulation, bioremédiation, relation Homme-Nature

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 » des écosystèmes marins, selon 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).

Une pollution mondiale

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 (« 7ème 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 quatre 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).

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. 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).

Toxicité des plastiques et perturbation des chaînes alimentaires

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). Au plan chimique, les matières plastiques sont constituées d'enchaînements de séquences identiques (ou polymères) de molécules carbonées, principalement d'hydrocarbures*, molécules organiques toxiques pour de nombreux organismes, susceptibles de s'accumuler le long des chaînes alimentaires.

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 entre 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 dispersion de composés toxiques qui peuvent aussi s'accumuler dans les chaînes alimentaires. Ces composés peuvent être directement présent dans la composition des plastiques, 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 conséquences 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).

La pollution par les plastiques en mer en quelques chiffres

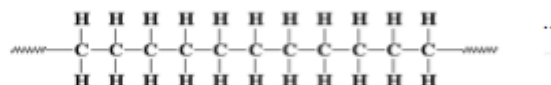
225 millions tonnes de plastiques produits par an
0,1% de la production mondiale arrive en mer (**45 000 tonnes/an**)
5250 milliards de particules plastiques flottent dans les océans,
équivalant à **268 940 tonnes**

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

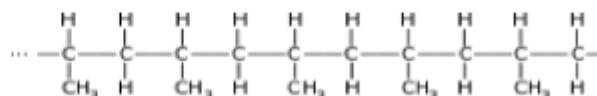
80% des déchets retrouvés en mer proviennent de la terre
30% des déchets plastiques retrouvés en mer proviennent des ménages

Principaux plastiques retrouvés en mer :

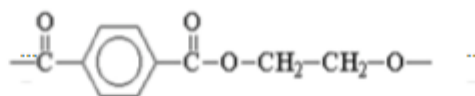
Polyéthylène (PE)



Polypropylène (PP)



Polytéréphthalate d'éthylène (PET)



Dégradation des plastiques en mer

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 des bactéries (Shah et al., 2008). Organismes les plus abondants 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), 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 la dégradation en mer

Un plastique qui arrive en mer va d'abord subir une dégradation abiotique (non biologique). Des dégradations physiques (vagues, température et UV) 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 quatre étapes successives (Figure 1).

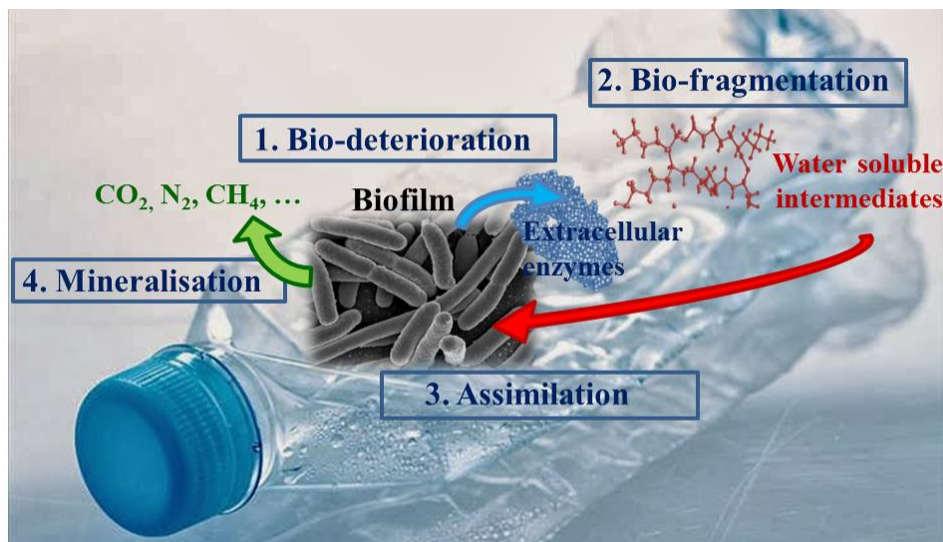


Figure 1 : Les différentes étapes de la biodégradation du plastique par les bactéries (Dussus et Ghiglione, sous presse).

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.

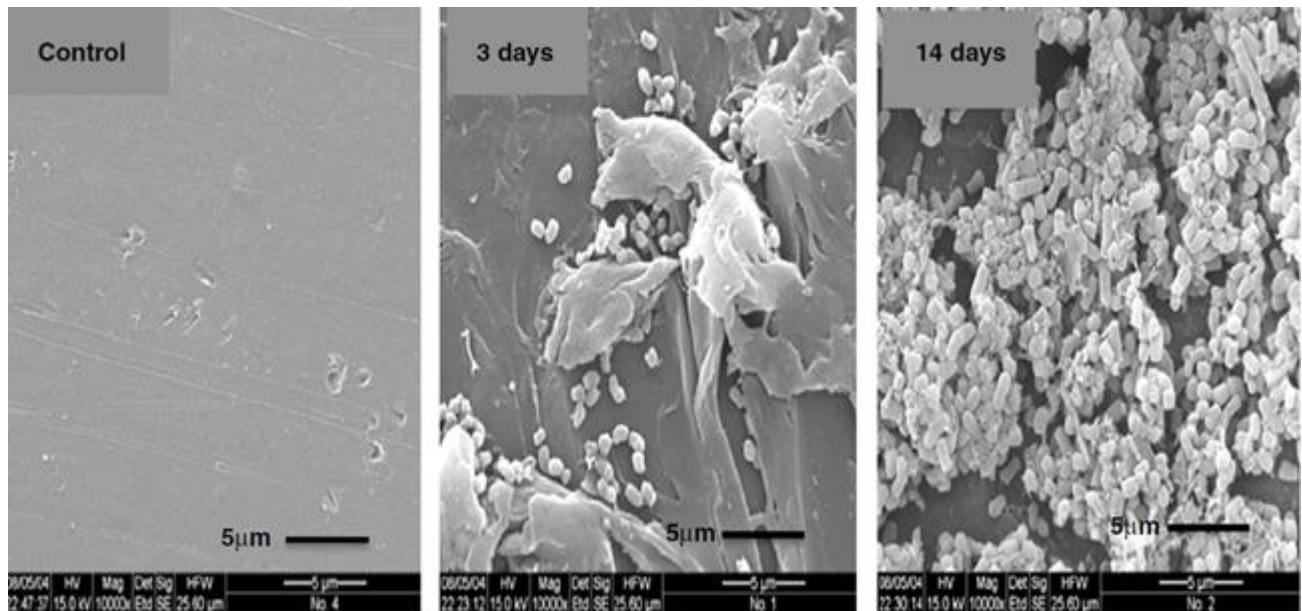


Figure 2 : Biofilm formé par *Rhodococcus ruber* C208 sur la surface de polyéthylène UV photo-oxydée, observé au microscope électronique à balayage. Initiation de la biodégradation détectée dans les 3 jours. Contrôle : Surface non inoculée (selon Sivan et al. 2011).

2. La bio-fragmentation est l'action d'enzymes bactériennes libérées à l'extérieur des cellules pour cliver les polymères plastiques en séquences plus courtes, 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 (daltons) 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 : 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 six 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 – en milieu marin notamment – 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 et l'innovation peuvent proposer d'autres solutions.

Les plastiques biodégradables sont de deux types :

– Les plastiques « hydro-biodégradables » ou « biosourcés » sont des produits issus de l'agriculture tels que l'amidon de maïs ou de pomme de terre. Si ce type de plastiques répond à la norme EN 13432 (qui suppose leur compostage), sa dégradation en milieu « naturel » 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 (utilisation d'engrais et de pesticides pour améliorer le rendement des récoltes).

– 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 leur biodégradation 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).

Glossaire

Bactéries chimiolithotrophes : Bactéries puisant leur énergie dans les liaisons chimiques de composés minéraux.

Bactéries chimioorganotrophes : Bactéries puisant leur énergie dans les liaisons chimiques de molécules organiques.

Groupement carboxyle : – CO₂

Gyre océanique : tourbillon d'eau océanique formé d'un ensemble de courants marins et provoqué par la force de Coriolis.

Hydrocarbure : composé organique constitué exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène.

Organismes saprophytes : micro-organismes qui se nourrissent de matières organiques en décomposition qu'ils transforment en matière minérale.

Poissons pélagiques : poissons vivant et se nourrissant dans la colonne d'eau.

Pyroséquençage haut débit : technique permettant de séquencer le génome rapidement avec une lecture directe de la séquence.

SIP : Stable Isotope Probing, technique en écologie microbienne qui permet de tracer les flux de nutriments utilisés par les microorganismes. Le substrat est enrichi avec un isotope stable qui est consommé par les organismes à étudier.

Zooplankton : organismes de type animal qui flottent au gré des courants, ils sont à la base de la plupart des chaînes alimentaires.

Bibliographie

Andrady AL, 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62: 1596-1605.

Bonhomme S, Cuer A et al. 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, Galgani F, Voisin P, Collard F et Goffart A, 2012. Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. *Marine pollution bulletin*, 64(4): 861-864.

Cózar A, Echevarría , et al., 2014. Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(28): 10239-10244.

Davison P et Asch RG, 2011. Plastic ingestion by mesopelagic fishes in the North Pacific Subtropical Gyre. *Marine Ecology Progress Series*, 432: 173-180.

Dussud C and Ghiglione JF. Bacterial degradation of synthetic plastics. *CIESM Monograph 46 on Marine Litters*. Sous presse.

Eriksen M, Lebreton LC et al, 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 and 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 and 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 and Cizer O., 2007. Assessment of material use in relation to climate in historical buildings. *Building and Environment*, 42: 970-978.

Ivar do Sul JA and Costa MF, 2014. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution*, 185: 352-364.

Lebreton LCM, Greer SD and Borrero JC, 2012. Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Mar Pollut Bull* 64(3): 653–661.

Lithner D, Larsson A and 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 and 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 and a;., 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 and Ahmed S, 2008. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology advances*, 26(3): 246-265.

Teuten EL, Saquing JM et al., 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 and Galloway TS, 2013. The physical impacts of micro- plastics on marine organisms: a review. *Environ. Pollut.* 178: 483e492.

Zettler ER, Mincer TJ and Amaral-Zettler LA, 2013. Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science and Technology*, 47: 7137-7146.

—

Article édité et mis en ligne par Anne Teyssède.