



# LES PROMESSES DU BIOPLASTIQUE

Face à la nécessité de développer des nouveaux matériaux pour remplacer le plastique, des chercheurs ont mis au point un procédé qui transforme des déchets végétaux en produits industriels biodégradables et compostables.

**Stéphane Bruzaud**, professeur des universités



**P**lusieurs lois interdisent déjà, ou interdiront prochainement, l'utilisation de plastiques dans certains secteurs si la matière n'est pas biosourcée et biodégradable (1). Par exemple, les sacs à usage unique (déjà proscrits depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2016), les plastiques développés pour la cosmétique, comme les microbilles exfoliantes ou les cotons-tiges, ou encore la vaisselle jetable – gobelets, assiettes, couverts, touillettes, pailles, etc. Le moment est donc venu de s'intéresser de plus près aux bioplastiques dont le marché, encore embryonnaire, est appelé à se développer. Car la production mondiale de matières plastiques continue hélas d'augmenter : elle a atteint 335 millions de tonnes en 2016, dont 40 % environ étaient destinés au marché

▲ *Le bioplastique est produit par l'Institut de recherche Dupuy de Lôme (Bretagne) à partir d'un mélange de bactéries marines et de déchets végétaux (fruits et légumes). Il permet de réaliser objets et emballages biodégradables.*

de l'emballage. Et malgré une croissance continue des plastiques biosourcés, plus de 99 % des plastiques sont encore d'origine pétrochimique. Or cette forte dépendance de l'industrie de la plasturgie à l'égard des ressources fossiles risque d'être difficile à gérer à terme. En effet, même si les avis divergent encore sur la cinétique d'épuisement des ressources fossiles, celles-ci vont de toute évidence se raréfier progressivement. La nécessité de développer rapidement des nouveaux matériaux est d'autant plus cruciale que les sacs plastiques à usage unique dont l'épaisseur est inférieure à 50 micromètres (donc non réutilisables) sont désormais interdits en caisse des magasins. En dehors des caisses, les commerçants ont l'obligation d'utiliser des sacs en papier, ou en plastique biosourcé et compostable. Que signifient ces deux termes? ●●●



■ **1926** Maurice Lemoigne identifie le premier polymère synthétisable par une bactérie.

■ **2016** La distribution de sacs plastiques à usage unique est interdite.

■ **2020** La vente de vaisselle en plastique jetable est interdite, à l'exception des éléments biosourcés et biodégradables.

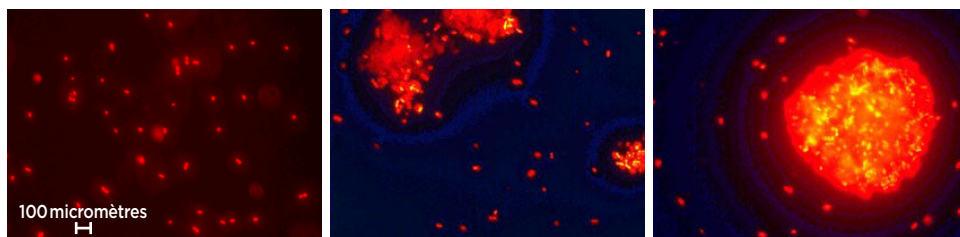
●●● Bien qu'utilisés dans le langage courant, ils relèvent de normes techniques. Le premier, « biosourcé », qualifie un plastique dont une fraction au moins est issue d'une matière première renouvelable d'origine végétale ou animale. On utilise la datation au carbone 14 pour déterminer ce taux : certains plastiques peuvent être totalement biosourcés quand d'autres ne le sont que très partiellement. Dans la pratique, on applique la norme ASTM D6866 pour classer les plastiques selon leur teneur en matière renouvelable. Quant au second terme, « compostable », il désigne des plastiques capables de se dégrader en fin de vie par fermentation biologique en les mélangeant ou non à divers déchets organiques. De nombreuses normes définissent aujourd'hui ces deux termes selon les conditions expérimentales dans lesquelles sont mis en œuvre les tests. Historiquement, ils sont définis en Europe par une norme reconnue au niveau mondial, la NF EN 13432, qui décrit les conditions à satisfaire pour qu'un emballage soit déclaré biodégradable par voie de compostage dans des conditions industrielles. Mais comment produire ces plastiques biosourcés et compostables ? Il faut trouver un procédé respectueux de l'environnement qui permette de transformer des matières premières d'origine végétale en un produit industriel compostable ayant les mêmes propriétés que les matières plastiques. Actuellement, la majeure partie des polymères (\*) biosourcés disponibles sur le marché est issue de la transformation des sucres et des amidons complexes extraits de différentes plantes : maïs, blé, canne ou betterave à sucre... Leur production nécessite donc de mobiliser des surfaces cultivables, ce qui n'est pas souhaitable, car cela se fait au détriment des cultures alimentaires. Une autre catégorie de polymères biosourcés est produite à partir d'huiles végétales : huiles de palme, de soja, de colza, de ricin... Ce qui pose également le problème d'occupation des terres cultivables. En outre, beaucoup de ces bioplastiques ne sont pas compostables.

Pour contourner ces deux problèmes – mobilisation de terres agricoles et biodégradabilité incomplète – mais aussi pour valoriser une filière de production locale, notre laboratoire, l'Institut de recherche Dupuy de Lôme (IRDL), situé en Bretagne, s'est intéressé à une certaine famille de polymères, les polyhydroxyalcanoates ou PHA. Ces polyesters (\*) nous paraissent très prometteurs pour trois raisons : on peut les faire synthétiser entièrement par des bactéries placées dans un substrat de matière carbonée ; ils peuvent servir à la fabrication d'emballages ; ils sont totalement biodégradables.

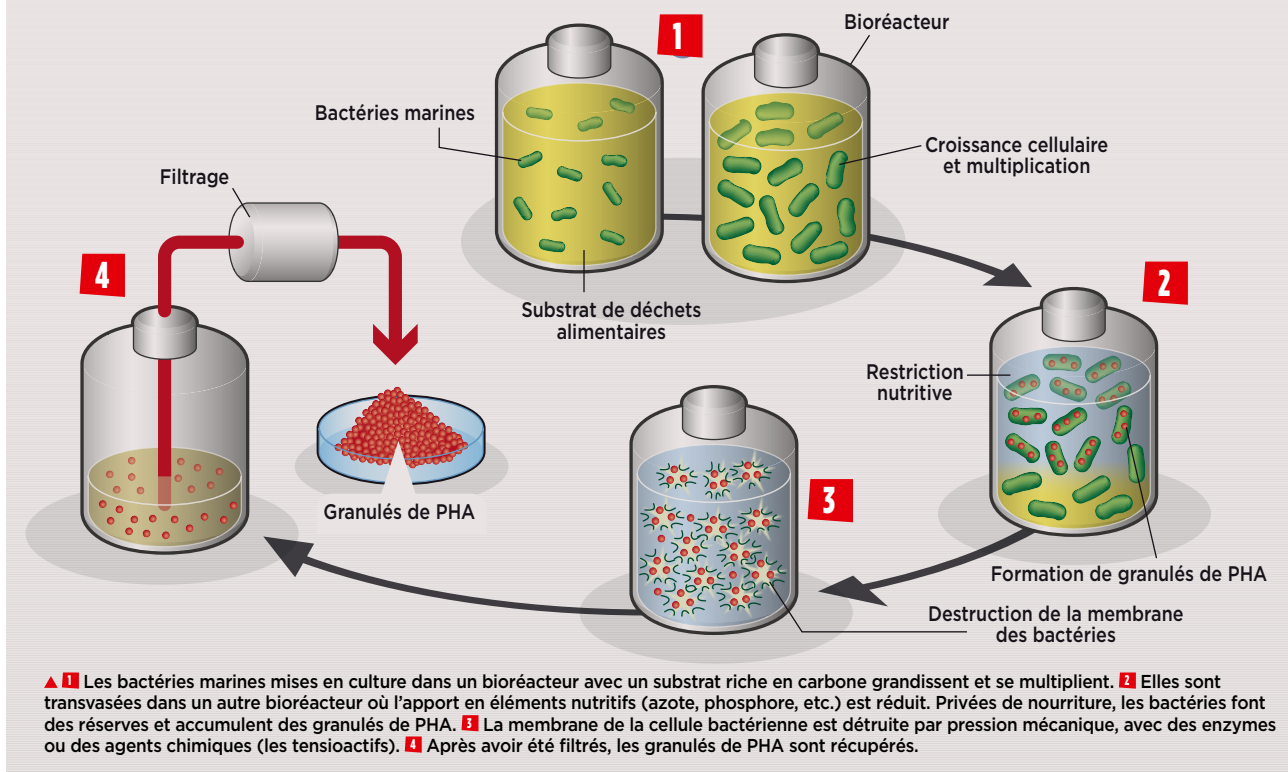
### FORMATION D'UN MATÉRIAU SOLIDE

De nombreux types de PHA ont été identifiés. Mais le premier d'entre eux, le poly(3-hydroxybutyrate), avait été découvert par hasard, en 1926, par Maurice Lemoigne à l'Institut Pasteur, chez la bactérie *Bacillus megaterium*. Le biologiste avait constaté que des suspensions aqueuses de cette bactérie s'acidifient lorsqu'elles sont privées d'oxygène. Il attribua ce phénomène à l'acide  $\beta$ -oxobutyrique. Et quelques années plus tard, il mit en évidence la formation d'un matériau solide, le PHA, dans le cytoplasme de cette bactérie, à la suite de l'acidification du milieu. Il suggéra dans ses publications que ce matériau était issu « de la déshydratation et de la polymérisation de l'acide  $\beta$ -oxobutyrique ». Et l'on a compris par la suite que les PHA sont synthétisés et stockés dans le cytoplasme des cellules bactériennes grâce à une enzyme, la PHA synthase. Cependant, en raison du développement de la pétrochimie tout au long du XX<sup>e</sup> siècle, la découverte des PHA resta relativement confidentielle pendant plusieurs décennies. C'est seulement vers les années 1990 que les scientifiques s'intéressèrent à ces polymères en raison de leur caractère biodégradable. Depuis lors, plus de 300 souches bactériennes capables de produire des PHA ont été recensées par différentes

► Les granulés de PHA (en rouge) s'accumulent dans le cytoplasme d'une bactérie (en noir). Cette image au microscope montre le niveau de production au bout de 10 heures, de 50 heures et de 67 heures (de gauche à droite).



**Fig. 1** Fabrication des polyhydroxyalcanoates (PHA)



équipes à travers le monde. Une telle variété présente un grand intérêt, car elle permet d'optimiser le choix du couple bactérie-substrat carboné afin d'obtenir le meilleur rendement.

En pratique, pour produire des PHA, nous utilisons un procédé de fermentation qualifié de discontinu, car il se déroule en deux étapes (Fig. 1). La première phase consiste à mettre en culture les bactéries avec un substrat riche en carbone, pendant plusieurs heures, dans un bioréacteur, afin qu'elles grossissent et se multiplient.

Le bioréacteur est une cuve qui permet de contrôler les conditions de fermentation : température, pression en oxygène et acidité, entre autres. Nous avons décidé d'utiliser des bactéries marines issues d'une collection privée appartenant à l'université Bretagne-Sud (UBS). Elles proviennent de souches isolées en mer d'Iroise sur différents mollusques. Pour le substrat, nous avons choisi des déchets végétaux (fruits et légumes) issus de la filière agroalimentaire bretonne, afin de nous affranchir des cultures agricoles à vocation

alimentaire. Et aussi parce que notre objectif est de développer l'économie territoriale en utilisant des ressources disponibles localement.

À l'issue de cette première phase, l'étape de production des PHA proprement dite peut commencer. Elle va durer 35 heures environ. Nous transvasons notre mélange dans un second bioréacteur où l'on diminue le substrat afin de restreindre la quantité d'éléments nutritifs (magnésium, azote ou phosphore) nécessaires à la croissance et au développement des bactéries. C'est lorsque les bactéries sont ainsi privées de nourriture qu'elles se mettent à fabriquer et à accumuler dans leur cytoplasme des granules de PHA en tant que substance carbonée de réserve. En raison de leur faible solubilité, ces granules, dont la taille est inférieure à 1 micromètre, exercent une pression négligeable sur les parois de la cellule bactérienne. C'est donc un matériau de stockage de carbone et d'énergie idéal pour les bactéries. Nous avons en outre cherché à optimiser la production des PHA en fonction des ●●

(\*) **Un polymère** est une macromolécule qui constitue la matière de base d'un plastique.

(\*) **Un polyester** est un polymère contenant des fonctions esters dans sa chaîne macromoléculaire. Ces fonctions sont susceptibles d'être hydrolysées, amorçant ainsi le processus de dégradation.

••• différents couples substrat-bactérie possibles afin d'obtenir une production aux qualités constantes. Nous avons donc mis au point une technique de suivi en temps réel de cette production. Pour cela, nous injectons dans le cytoplasme des bactéries un marqueur fluorescent qui réagit aux composés lipidiques des granules de PHA. Cette opération nous permet d'évaluer qualitativement et quantitativement la teneur en PHA du milieu de culture. En pratique, nous parvenons à produire plusieurs grammes de PHA par litre.

Enfin, dernière étape pour obtenir du bioplastique : extraire les PHA du cytoplasme des bactéries. Il faut d'abord séparer les bactéries de leur milieu de culture, par centrifugation ou filtration. Puis détruire la membrane de la cellule bactérienne pour en extraire les PHA. Pour cela, nous avons volontairement renoncé à la méthode classique en chimie, qui consiste à utiliser des solvants chlorés, chloroforme ou dichlorométhane, coûteux et nocifs pour l'environnement. D'autres méthodes ne présentent pas ces inconvénients. Par exemple, on peut éclater la cellule bactérienne par pression mécanique, recourir à des enzymes pour dégrader les parois bactériennes et libérer les granules de PHA, ou encore utiliser des tensioactifs (\*). Dans notre laboratoire, nous avons recours à une combinaison de ces procédés dont le détail reste confidentiel. Les granules de PHA obtenus pourront servir ensuite à la production de produits en plastique, des objets destinés au secteur de l'emballage entre autres.

### BIODÉGRADATION EN MILIEU MARIN

En fin de vie, les PHA présentent un autre intérêt, leur biodégradabilité. En effet, le processus de polymérisation est réversible sous l'action d'une enzyme, la PHA dépolymérase, excrétée par les mêmes bactéries à l'origine de la production des PHA. Ces bactéries sont donc capables de dégrader le PHA lorsqu'on les met au régime afin d'en récupérer les nutriments et l'énergie nécessaires à leur survie. En fait, un nombre important de bactéries et de champignons peut dégrader les PHA en présence ou non d'oxygène. La cinétique et le taux de biodégradation dépendent de nombreux facteurs, dont la population microbienne, le taux d'humidité, la température, la présence d'oxygène, l'acidité du milieu, mais également le type de PHA.

(\*) **Un tensioactif** est un agent chimique capable de modifier la tension superficielle entre deux surfaces.



▲ Ce gobelet en bioplastique a été réalisé par le programme de recherche BluEcoPHA, qui associe des chercheurs et des industriels.

Ainsi, dans notre laboratoire, nous avons validé qu'un certain type de PHA est particulièrement biodégradable en milieu naturel marin. Nous avons réalisé un test de biodégradation dans un liquide à 25 °C composé d'eau de mer et de sable. Résultat : ce PHA a été dégradé à plus de 90 % après 220 jours. Par comparaison, la principale matière des végétaux, la cellulose, qui fait référence en la matière, n'est dégradée qu'à 50 % dans le même milieu. La très forte biodégradabilité de ce PHA offre une perspective intéressante à l'heure où l'on cherche à limiter la pollution des mers et des océans par les emballages en plastique. En effet, depuis 1997, année de la découverte par l'explorateur américain Charles Moore d'un premier « continent de plastique » dans l'océan Pacifique, de nombreuses expéditions ont mis en évidence la prolifération dramatique de ces déchets dans tous les océans du monde. Les conséquences sont désastreuses pour la faune et la flore marines, d'autant que la dégradation des plastiques traditionnels peut prendre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années. Étant particulièrement concernés par ces problèmes de pollution maritime, nous sommes associés depuis 2013 à l'expédition Tara et à l'expédition MED dont les objectifs sont, entre autres, d'évaluer et de caractériser la pollution au plastique en milieu marin.

Désormais, notre laboratoire travaille à l'industrialisation de la production de PHA. Il existe un grand nombre de substrats et de bactéries possibles. On peut donc générer avec les PHA une large palette de polyesters aux propriétés mécaniques et physico-chimiques variées, notamment en termes de souplesse ou de rigidité. De telles qualités ouvrent la voie à des marchés de masse – emballages, produits d'hygiène jetables (rasoirs, brosses à dents, etc.) – ou destinés aux secteurs de la pêche et de l'agriculture. Même si, pour l'instant, les prix de fabrication élevés des PHA les réservent aux marchés des niches à forte valeur ajoutée : biomédical, impression 3D ou électronique. Cependant, nous pensons que l'utilisation de ressources exclusivement renouvelables, les avancées technologiques pour développer des procédés industriels « propres » et la biodégradabilité feront des PHA des bioplastiques de choix dans un futur proche. ■

(1) Loi n° 2015-992 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (art. 73 et 75) et loi n° 2016-1087 relative à la reconquête de la biodiversité (art. 124).

#### Pour en savoir plus

■ <http://people.irdl.fr/stephane-bruzaud>

■ P. Lemechko et S. Bruzaud, « La biotechnologie au service de la chimie pour obtenir des polymères bactériens biodégradables », *L'Actualité chimique*, numéro spécial « Chimie durable », 2018.