

Quelle place pour les matériaux biodégradables dans les innovations en emballage alimentaire

Thị-Thanh-Trúc PHÙNG ^a, Isabelle SEVERIN ^b, Amandine HACHET ^c, Thomas KARBOWIAK ^a

^a Université Bourgogne Europe, Institut Agro Dijon, INRAE, UMR PAM, 1 Esplanade Erasme, 21000 Dijon, France

^b Équipe Nutrition et Toxicologie, UMR 1231 CTM INSERM/IAD/UBE, 1 esplanade Erasme, 21000 Dijon, France

^c Chaire Emballages 3R ; Fondation de l'Institut Agro, 26 boulevard Petitjean, 21000 Dijon, France

Les industries de l'agro-alimentaire et de l'emballage font face à un tournant décisif, en particulier en Europe et en France, où des cadres réglementaires tels que le règlement européen sur les emballages et les déchets d'emballages (PPWR 2025) et la loi française relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (AGEC) encouragent une transition reconsidérant l'usage des matériaux conventionnels. Ces politiques imposent en effet une recyclabilité accrue, l'utilisation de matières recyclées et des restrictions favorisant l'adoption d'alternatives plus durables. Bien que ces réglementations ne l'encouragent pas en premier lieu, la production mondiale de bioplastiques connaît une croissance rapide, avec un intérêt particulier pour les matériaux biodégradables tels que les polyhydroxyalcanoates (PHA) et les polylactides (PLA). Ils peuvent en outre répondre aux critères de compostabilité pour leur fin de vie, voire de recyclabilité. Cette synthèse propose un aperçu des matériaux d'origine biologique émergents pour l'emballage alimentaire, actuellement disponibles à grande échelle ou encore en phase de recherche. En fin, les stratégies visant à améliorer la fonctionnalité de ces matériaux sont discutées au regard des exigences liées à l'application emballage alimentaire.

ABSTRACT

The food packaging industry is at a pivotal point of transformation, particularly in France, where regulatory frameworks like the European Union's Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR 2025) and France's Anti-Waste and Circular Economy Law (AGEC) are driving a transition from conventional plastics. These policies mandate higher recyclability, the use of recycled content, and restrictions encouraging the adoption of more sustainable alternatives. Even if not primarily encouraged by these regulations, the global production of bioplastics is expanding, particularly biodegradable materials such as polyhydroxyalkanoates (PHA) and polylactides (PLA). They can interestingly match the criteria of compostability for their end of life or even recyclability. This review provides an overview of emerging food packaging materials currently available in large-scale production or under research. In addition, the article presents strategies to improve the functionality of these materials to meet the requirements of food packaging applications.

Elles figurent dans le règlement sur les emballages et les déchets d'emballages (PPWR), entré en vigueur au début de l'année 2025. Les principales modifications apportées par le PPWR 2025 par rapport à la directive sur les emballages et les déchets d'emballages (PPWD) de 1994 qu'il vient remplacer, sont présentées dans le **Tableau 1**.

En France, sous l'effet conjugué du règlement européen PPWR 2025 et de la loi française Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire (AGEC) de 2020, des changements majeurs sont en cours concernant l'utilisation des matériaux plastiques dans les emballages alimentaires. Ces deux réglementations marquent une rupture significative avec les plastiques conventionnels à usage unique, au profit de matériaux plus durables, recyclables et/ou réutilisables. Le PPWR exige en effet que tous les emballages soient recyclables d'ici 2030, selon des critères stricts garantissant une recyclabilité effective. D'ici 2030, les emballages en plastique devront contenir un minimum de matières recyclées, en fonction du type d'emballage : 30 % pour les emballages en PET à contact alimentaire, 30 % pour les bouteilles de boisson à usage unique et 35 % pour les autres emballages en plastique. D'ici 2040, ces objectifs passeront respectivement à 50 %, 65 % et 65 %. Le PPWR impose également des restrictions sur les substances dangereuses, telles que les PFAs, souvent utilisées dans les emballages alimentaires résistants aux graisses. En France, la loi AGECE était déjà venue renforcer cette dynamique en interdisant à l'échelle nationale certains articles en plastique à usage unique, en éliminant les emballages jugés superflus et en rendant obligatoire l'usage de vaisselle réutilisable dans les restaurants depuis 2023. Ces orientations visent à aboutir à une meilleure circularité des matériaux, en particulier dans le secteur de l'emballage. Si la priorité est donnée à la recyclabilité des matériaux ainsi qu'au réemploi, la valorisation des matériaux d'origine biologique pour une fin de vie organique demeure une stratégie de développement potentielle.

1. CONTEXTE GLOBAL ET TENDANCES DE L'EMBALLAGE ALIMENTAIRE EN FRANCE

« Le cycle de vie actuel des plastiques est loin d'être circulaire »
1. En effet, au cours des 20 premières années du XXI^{ème} siècle, la production annuelle mondiale de plastiques conventionnels a doublé. Selon l'OCDE, la production mondiale de plastique s'élevait à 460 Mt en 2019. Sur les 353 Mt de déchets plastiques générés cette même année, seuls 9 % ont été recyclés, tandis que 19 % ont été incinérés et 50 % mis en décharge ¹.

Dans ce contexte, l'Union européenne a adopté une série de nouvelles mesures réglementaires visant à renforcer la gestion, l'utilisation et le traitement des déchets plastiques.

Cette démarche pourrait répondre à la fois aux pressions réglementaires et à la demande croissante pour des solutions alternatives aux matériaux conventionnels.

2. ÉTAT ACTUEL DE LA PRODUCTION MONDIALE DE BIOPLASTIQUES

Selon European Bioplastics, les bioplastiques sont définis comme des matériaux plastiques qui sont soit biosourcés, soit biodégradables, ou qui possèdent les deux propriétés. Les matériaux biosourcés sont issus de ressources biologiques renouvelables. Les matériaux biodégradables, quant à eux, peuvent être décomposés par des micro-organismes naturellement présents dans l’environnement en substances telles que l’eau, le dioxyde de carbone et le compost, sans ajout d’additifs. Par ailleurs, il est important de noter que « biosourcé »

ne signifie pas nécessairement « biodégradable », car la biodégradabilité dépend de la structure chimique du matériau, et non de son origine. Ainsi, un matériau peut être entièrement biosourcé sans être biodégradable, ou au contraire entièrement issu de ressources fossiles tout en étant biodégradable ².

D’après le rapport European Bioplastics 2024, la production de bioplastiques est en croissance ces dernières années, passant de 2,019 Mt en 2023 à 2,469 Mt en 2024, soit une augmentation de 22 % ³. Cependant, cela ne représente que 0,5 % des 400 Mt de plastiques produits en 2023 ⁴.

Selon la **Figure 1**, extraite de ce même rapport, le matériau biodégradable le plus produit en 2024 est le PLA, représentant 37 % de la production. Sa proportion devrait atteindre 42,3 % d’ici 2029. Parmi les autres plastiques biosourcés et biodégradables produits à l’échelle industrielle figurent les polymères à base

Catégorie	PPWD 1994	PPWR 2025
Recyclabilité	Tous les emballages n’étaient pas obligatoirement recyclables. Certains matériaux étaient difficiles voire impossibles à recycler.	Tous les emballages devront être recyclables d’ici 2030, selon des critères stricts de recyclabilité.
Contenu recyclé	Aucun contenu recyclé obligatoire pour la plupart des matériaux d’emballage.	D’ici 2030, les emballages en plastique devront contenir un minimum de matières recyclées : 30 % pour les emballages en PET à contact alimentaire, 30 % pour les bouteilles de boisson à usage unique et 35 % pour les autres emballages en plastique. D’ici 2040, ces objectifs passeront respectivement à 50 %, 65 % et 65 %.
Objectifs de réemploi et de recharge	Pas d’objectifs uniformes à l’échelle de l’UE pour les emballages réutilisables.	Objectifs de réutilisation : 10 % pour les emballages de boissons d’ici 2030 et jusqu’à 40 % en 2040.
Plastiques à usage unique	Interdiction de certains articles en plastique à usage unique (ex : pailles, couverts) suite à la directive SUPD (2019).	Nouvelles interdictions ciblant certains types d’emballages plastiques et restrictions sur les emballages superflus.
Bouteilles de boisson	Pas d’exigences strictes sur le contenu recyclé des plastiques.	Les bouteilles de boisson en plastique à usage unique doivent contenir au moins 30 % de plastique recyclé d’ici à 2030 et 65 % d’ici à 2040.
Substances per- et polyfluoroalkylées (PFAs)	Certains emballages contenaient des PFAs pour la résistance à l’eau et aux graisses.	Restriction des PFAs dans les emballages alimentaires (ex : interdiction en France dans les matériaux au contact des aliments à partir de janvier 2026).
Emballages biodégradables et compostables	Aucun cadre clair sur les normes de compostabilité.	Lignes directrices strictes sur les emballages compostables, autorisés uniquement s’ils améliorent la gestion des déchets.
Réduction du suremballage	Aucune règle contraignante pour réduire le suremballage.	Réduction obligatoire des déchets d’emballages, avec obligation pour les entreprises de minimiser l’utilisation de matériaux.
Étiquetage et information du consommateur	Pas d’étiquetage standardisé sur la recyclabilité.	Étiquetage clair et harmonisé pour les emballages, incluant les consignes de tri et de recyclage.
Frais REP harmonisés (Responsabilité Élargie du Producteur)	Systèmes REP différents selon les États membres, causant des incohérences.	Frais REP uniformes fondés sur la recyclabilité et l’impact environnemental dans toute l’UE.

Tableau 1. Modifications apportées par le règlement sur les emballages et les déchets d’emballages (PPWR) de 2025 par rapport à la précédente directive sur les emballages et les déchets d’emballages (PPWD) de 1994, au niveau de l’Union européenne.

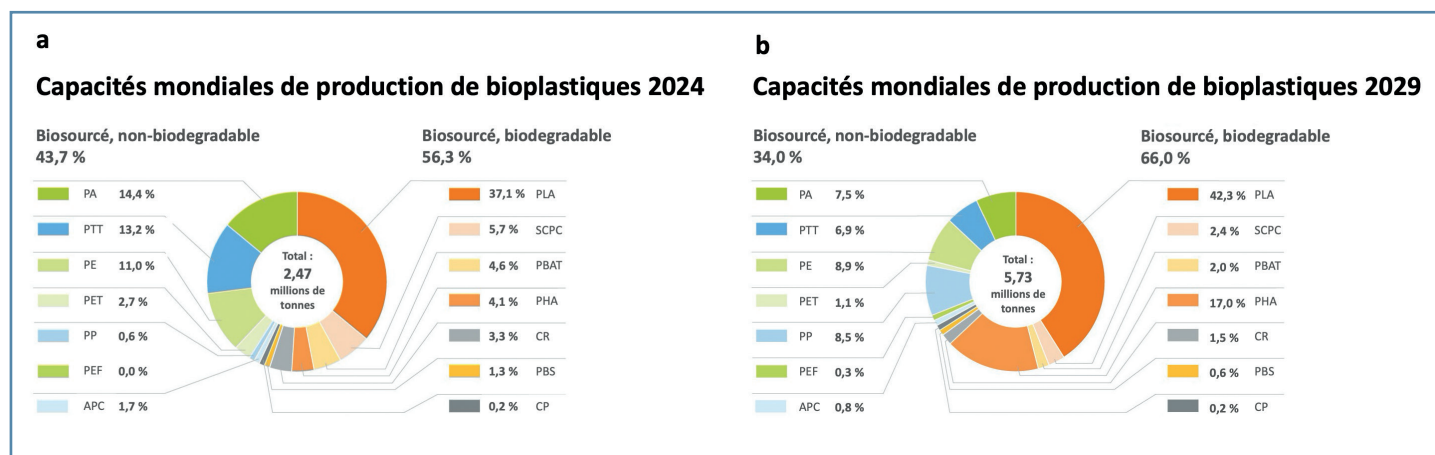


Figure 1. Capacités mondiales de production de bioplastiques **a.** en 2024 ; **b.** en 2029³. **APC** : Polycarbonates aliphatiques, **CP** : Caséine, **CR** : Celluloses, **PA** : Polyamides, **PBAT** : Poly(butylène adipate-co-téréphthalate), **PBS** : Succinate de polybutylène et copolymères, **PE** : Polyéthylène, **PEF** : Polyéthylène furanoate, **PET** : Polyéthylène téréphthalate, **PHA** : Polyhydroxyalcanoates, **PLA** : Polylactide, **PP** : Polypropylène, **PTT** : Polytriméthylène téréphthalate, **SCPC** : Polymères à base d'amidon.

d'amidon, le polybutylène adipate-co-téréphthalate (PBAT), les PHA, le PBS, les dérivés de la cellulose ainsi que la caséine. La tendance prévue pour les prochaines années est une réduction des bioplastiques non biodégradables et une augmentation de ceux biodégradables, en particulier le PLA et les PHA, en raison de leur capacité à être au contact alimentaire. Cette tendance rejoint en effet les exigences des réglementations internationales sur les matériaux d'emballage alimentaire, comme mentionné dans la Section 1.

3. MATÉRIAUX ÉMERGENTS POUR LES APPLICATIONS D'EMBALLAGE ALIMENTAIRE

Bien que des efforts importants ont été menés en recherche ces dernières années afin de s'orienter vers des matériaux d'origine biologique capables de se substituer aux matériaux

d'origine fossile, leur utilisation à l'échelle industrielle demeure relativement faible. Comme illustré dans la **Figure 2**, diverses sources ont été explorées, comprenant des polymères extraits de bioressources végétales, animales ou microbiennes (polyosides, protéines ou lipides) ou des polymères biodégradables produits par voie de synthèse à partir de matières d'origine biologique.

Comparer les propriétés fonctionnelles de ces matériaux demeure cependant difficile car les conditions expérimentales des différentes études ne sont pas toujours uniformisées, notamment l'épaisseur des films, l'humidité relative, la température ou encore les méthodes d'essai utilisées. Récemment, Ureña *et al.* (2023) ont étudié neuf polyosides issus de différents sources naturelles, comprenant l'hydroxypropylméthylcellulose, l'hydroxypropylcellulose, la méthylcellulose, le chitosane, l'alginate, la pectine, le carraghénane, l'amidon et le pullulane.

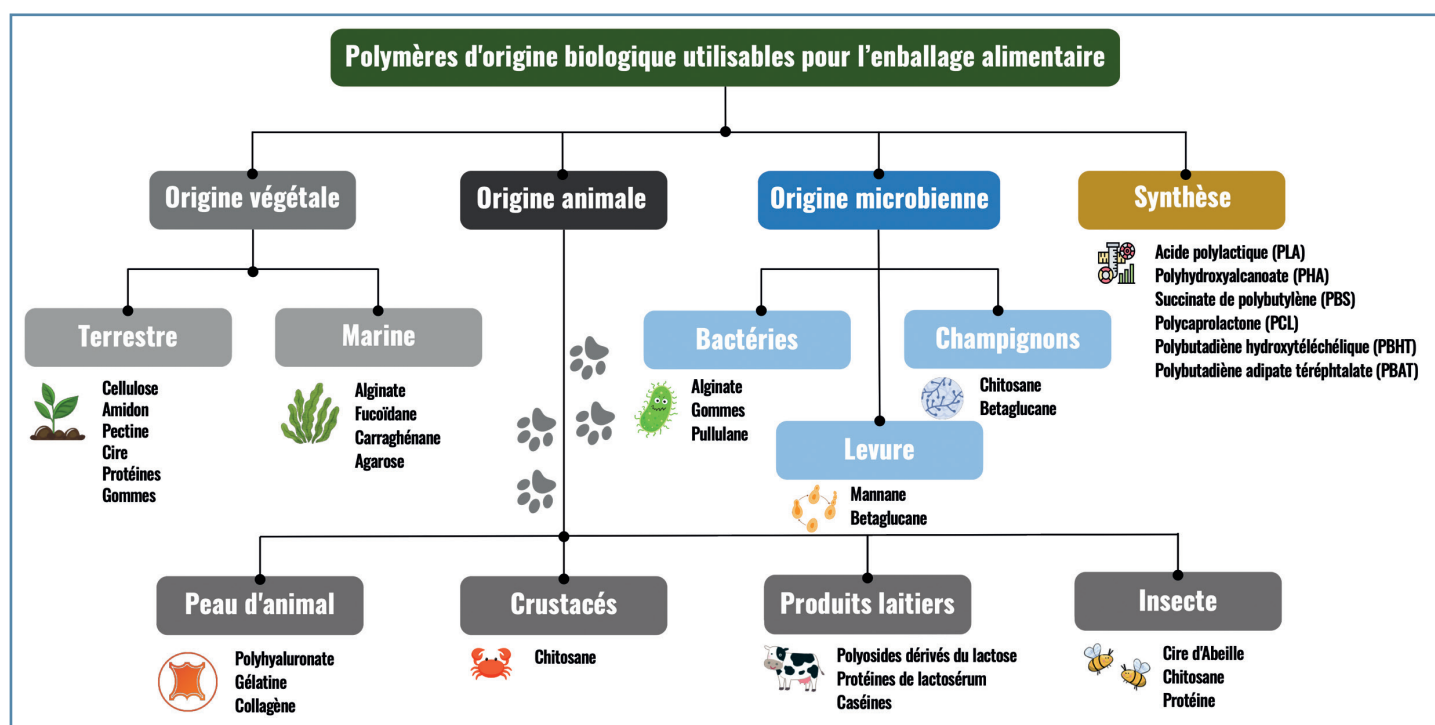


Figure 2. Matériaux d'origine biologique utilisables comme emballage alimentaire. Ils comprennent les polymères extraits des bioressources végétales, animales et microbiennes ainsi que les polymères biodégradables produits par voie de synthèse à partir de monomères d'origine biologique.

Les résultats indiquent que l’alginate présente des propriétés barrière à l’oxygène prometteuses comparativement aux autres polyosides testés ⁵. De plus, l’alginate présente la capacité de former des gels par réticulation ionotrope avec des cations divalents, ce qui le rend insoluble dans l’eau, et lui confère donc une propriété d’intérêt supplémentaire pour les applications d’emballage ou d’enrobage alimentaire.

En plus des polyosides extraits de sources biologiques, des protéines telles que les isolats de protéines de lactosérum, les isolats de protéines de soja, la gélatine, le collagène et la caséine ont également été étudiées pour des applications comme emballage alimentaire ⁶. Les principales limites de ces matériaux protéiques résident dans leurs faibles propriétés mécaniques, leur sensibilité à l’eau ainsi que leur coût élevé ⁷.

Outre les polymères extraits de bioressources, les polymères biodégradables produits par voie de synthèse à partir de monomères d’origine biologique sont également devenus un axe majeur de recherche ces dernières années. Les polylactides (PLA) et le poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) sont considérés comme deux des matériaux les plus prometteurs pour l’emballage alimentaire. Selon des études antérieures, le poly L-lactide (PLLA) présente une meilleure barrière à l’oxygène, mais reste moins résistant à la vapeur d’eau que le PET ⁸⁻¹⁰. En revanche, le PHB affiche de bonnes propriétés barrière à la fois à l’oxygène et à la vapeur d’eau ⁸. Toutefois, le PLLA comme le PHB présentent des propriétés mécaniques limitées, étant notamment très cassants ⁸.

La **Figure 3** compare les propriétés barrières à la vapeur d’eau et à l’oxygène de polymères extraits de différentes bioressources, de polymères pétrosourcés, ainsi que de polymères biodégradables produits par voie de synthèse. Il apparaît que,

parmi les polymères extraits des bioressources végétales, seul l’alginate de sodium (SA) répond aux exigences en matière de propriétés barrières pour être applicable à la conservation de produits tels que les fromages, les produits de boulangerie, et éventuellement servir pour des viandes. De plus, le SA, le PHB et le PLLA ont des propriétés barrières (oxygène, vapeur d’eau) supérieures à certains plastiques conventionnels comme le PET, le PP et le HDPE. Cela démontre le potentiel prometteur de ces polymères pour des applications dans l’emballage alimentaire avec cependant des améliorations nécessaires de leurs propriétés fonctionnelles pour être parfaitement adaptés aux différents types de produits à conditionner.

Toutefois, comme indiqué précédemment, la comparaison des propriétés barrières des matériaux d’emballage à partir de différentes études n’est souvent que relative. Il manque en effet fréquemment des données de référence. Par ailleurs, il serait nécessaire de réévaluer les durées de vie des produits en lien avec les propriétés barrières des emballages.

4. AMÉLIORATION DES PROPRIÉTÉS FONCTIONNELLES DES MATÉRIAUX D’EMBALLAGE ISSUS DE BIORESSOURCES

L’inconvénient majeur des matériaux d’emballage issus de bioressources reste souvent leur sensibilité à l’eau et leur faible performance barrière, ce qui constitue un obstacle majeur à leur utilisation pour de nombreux produits alimentaires ^{5,16}. Pour y remédier, plusieurs méthodes de modifications physiques et chimiques des polymères ont été proposées, telles que le traitement plasma, le traitement corona, la réticulation chimique, la fluoration, la silanisation, ainsi que le procédé chromatogénique (**Tableau 2**).

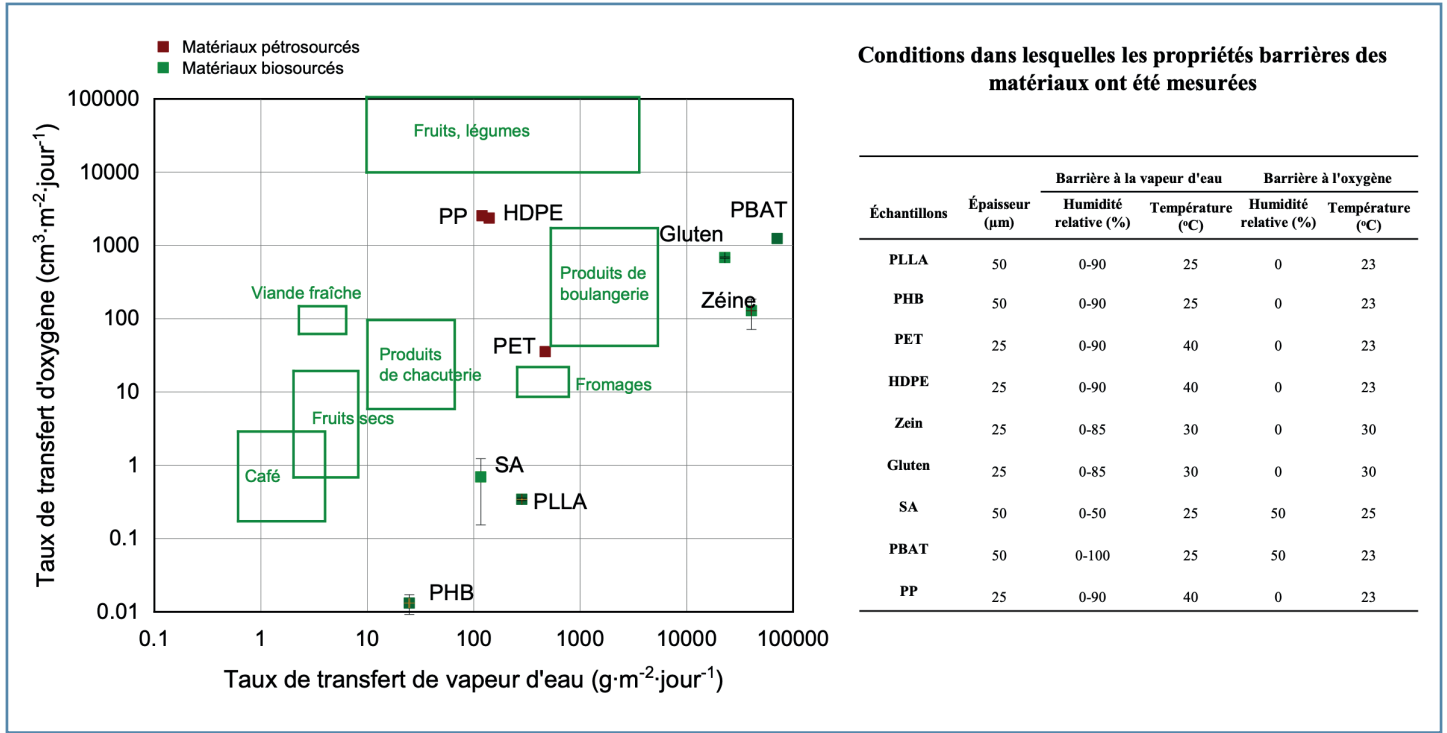


Figure 3. Comparaison des propriétés barrière de matériaux synthétiques biodégradables, de matériaux pétrosourcés et de matériaux biosourcés biodégradables illustrant leur adéquation aux exigences des emballages alimentaires selon les types de produits ¹².
PP : polypropylène ¹³, **HDPE** : polyéthylène haute densité ¹³, **PET** : polyéthylène téréphtalate ¹³, **PBAT** : poly(butylène adipate-co-téréphtalate ¹⁴, **PLLA** : poly(acide L-lactique) ^{8,9}, **PHB** : polyhydroxybutyrate ⁸, **SA** : alginate de sodium ⁵, **gluten** : gluten de blé ¹⁵, **zéine** : zéine de maïs ¹⁵.

		Technique	Principe	Principaux avantages	Limites	Applications dans l'emballage alimentaire
Procédés physiques utilisés à l'échelle industrielle		Traitement plasma	Modification de la chimie de surface par des gaz ionisés.	Améliore l'adhésion des revêtements, des encres et des films laminés.	Nécessite un équipement spécialisé.	Améliore l'adhésion des emballages multicouches.
		Traitement corona	Oxydation de la surface par une décharge haute tension.	Procédé économique, améliore l'adhésion des encres.		Impression de barquettes ou de films.
Procédés chimiques	Cas général	Greffage chimique	Formation de liaisons covalentes avec la surface des polymères.	Améliore les propriétés barrières à l'eau et aux graisses ; certains traitements demeurent biodégradables.	Certains agents chimiques peuvent nuire à la recyclabilité.	Matériaux pétrosourcés ou biosourcés, nécessitant une amélioration de la résistance à l'humidité et aux graisses.
	Exemples particuliers	Fluoration	Greffage de composés fluorés.	Excellente résistance à l'eau et aux graisses.	Aspects toxicologiques (PFAs) et recyclabilité à considérer.	Intérêt potentiel pour les emballages cellulosiques barrières aux graisses et à l'eau (ex : restauration rapide, gobelets, charcuterie/viennoiserie).
		Silanisation	Greffage de silanes.	Améliore la résistance à l'eau et l'adhésion.	Nécessite des surfaces propres, souvent prétraitées ; coûteux.	
		Procédé chromatogénique	Estérification de la cellulose avec des chlorures d'acides gras.	Biodégradable, bonne résistance aux graisses et à l'eau.	Conditions de réaction difficiles à contrôler.	

Tableau 2. Techniques physiques ou chimiques pour modifier les propriétés de surface des matériaux d'emballage alimentaire.

Conformément au PPWR 2025, certaines méthodes, comme la fluoration, risquent toutefois d'être restreintes à l'avenir en raison des préoccupations liées aux PFAs et des réglementations les interdisant dans les emballages alimentaires.

5. CONCLUSIONS

En France comme à l'échelle mondiale, l'utilisation des emballages connaît une transformation profonde, impulsée par des réglementations strictes. La mise en œuvre du PPWR 2025 de l'Union européenne et de la loi AGECE en France orientent fortement vers une économie circulaire, avec un accent particulier mis sur la recyclabilité, la réutilisation et la réduction des plastiques. Bien que ces réglementations ne l'encouragent pas en premier lieu et privilégient les filières conventionnelles, la production mondiale de bioplastiques connaît aussi une croissance rapide. Un intérêt particulier peut ainsi émerger pour certains matériaux biodégradables qui peuvent répondre aux critères de compostabilité pour leur fin de vie, voire de recyclabilité. Cet article présente différents matériaux biodégradables prometteurs en s'intéressant particulièrement à leurs propriétés barrières à l'eau et à l'oxygène.

Bien que certains défis subsistent, notamment concernant leur forte sensibilité à l'eau, des techniques de fonctionnalisation de surface pourraient améliorer les performances de ces matériaux. Par ailleurs, l'utilisation de nouveaux matériaux pour l'emballage alimentaire amène à se questionner sur la comparaison de leurs propriétés dans des conditions contrôlées et comparables, représentatives de leur utilisation au contact alimentaire. Enfin, les exigences spécifiques des produits alimentaires devraient être mieux définies afin de permettre le développement de matériaux répondant au juste besoin des produits selon leur durée de vie. ■

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le soutien de la chaire Emballages 3R, portée par la fondation de l'Institut Agro, et du programme investissement d'avenir France 2030 ANR-24-EMCO-0001.

GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS

- AGECE : loi Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire (Anti-Waste and Circular Economy Law)

- APC : polycarbonates aliphatiques (aliphatic polycarbonates)

- CP : polymères de caséine (casein polymers)

- CR : celluloses régénérées

- HDPE : polyéthylène haute densité (high-density polyethylene)

- OCDE : Organisation pour la Coopération et le Développement Économique

- PA : polyamides

- PBAT : polybutylène adipate-co-téréphtalate

- PBS : succinate de polybutylène (polybutylene succinate)

- PE : polyéthylène

- PET : polyéthylène téréphtalate

- PFAS : substances per- et poly(fluoroalkylées) (per- and polyfluoroalkyl substances)

- PHA : polyhydroxyalcanoates

- PHB : poly3-hydroxybutyrate

- PLA : polylactide

- PLLA : polyL-lactide

- PP : polypropylène

- PPWD : directive sur les emballages et les déchets d'emballages 94/62/CE (Packaging and Packaging Waste Directive)

- PPWR : règlement sur les emballages et les déchets d'emballages UE 2025/40 (Packaging and Packaging Waste Regulation)

- PTT : polytriméthylène téréphtalate

- REP : Responsabilité Élargie du Producteur

- SCPC : composés polymères contenant de l'amidon (Starch-Containing Polymer Compounds)

- SUPD : directive sur les plastiques à usage unique (UE) 2019/904 (Single-Use Plastics Directive)

RÉFÉRENCES

1. OECD publishing. *Global Plastics Outlook : Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD ; 2022. doi : 10.1787/DE747AEF-EN

2. European Bioplastics. Bioplastics. Accessed March 28, 2025. <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>

3. European Bioplastics. BIOPLASTICS MARKET DEVELOPMENT 2024. 2024. Accessed March 28, 2025. <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2024/#>

4. European Bioplastics. BIOPLASTICS MARKET DEVELOPMENT UPDATE 2023. 2023. Accessed April 10, 2025. https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2023-2/?utm_source=chatgpt.com

5. Ureña M, Phùng TTT, Gerometta M, et al. Potential of polysaccharides for food packaging applications an experimental review of the functional properties of polysaccharide coatings : Part 1/2. *Food Hydrocoll*. Published online June 8, 2023:108955. doi : 10.1016/J.FOODHYD.2023.108955

6. Bhavya EP, Raman M. Protein based bio-nanocomposite food packaging and applications : A Review. *Food and Humanity*. 2025;4:100565. doi : 10.1016/J.FOOHUM.2025.100565

7. Deng Y, Kolodjski S, Lewis G, Onan G, Kim Y. Physical and functional characterization of whey protein-lignin biocomposite films for food packaging applications. *Future Foods*. 2025;11:100554. doi:10.1016/J.FUFO.2025.100554

8. Chaos A, Sangroniz A, Gonzalez A, et al. Tributyl citrate as an effective plasticizer for biodegradable polymers : effect of plasticizer on free volume and transport and mechanical properties. *Polym Int*. 2019;68(1):125-133. doi : 10.1002/PI.5705

9. Sangroniz A, Chaos A, Iriarte M, Del Río J, Sarasua JR, Etcheberria A. Influence of the Rigid Amorphous Fraction and Crystallinity on Polylactide Transport Properties. *Macromolecules*. 2018;51(11):3923-3931. doi:10.1021/acs.macromol.8b00833

10. Sangroniz L, Ruiz JL, Sangroniz A, et al. Polyethylene terephthalate/low density polyethylene/titanium dioxide blend nanocomposites : Morphology, crystallinity, rheology, and transport properties. *J Appl Polym Sci*. 2019;136(4):46986. doi : 10.1002/APP.46986

11. Sangroniz A, Zhu JB, Tang X, Etcheberria A, Chen EYX, Sardon H. Packaging materials with desired mechanical and barrier properties and full chemical recyclability. *Nature Communications* 2019 10:1. 2019;10(1):1-7. doi : 10.1038/s41467-019-11525-x

12. Wang J, Gardner DJ, Stark NM, Bousfield DW, Tajvidi M, Cai Z. Moisture and Oxygen Barrier Properties of Cellulose Nanomaterial-Based Films. *ACS Sustain Chem Eng*. 2018;6(1):49-70. doi : 10.1021/ACSSUSCHEMENG.7B03523/ASSET/IMAGES/MEDIUM/SC-2017-03523J_0015.GIF

13. Massey LK. Permeability properties of plastics and elastomers : a guide to packaging and barrier materials. Published online 2003:601. Accessed April 8, 2025. https://books.google.com/books/about/Permeability_Properties_of_Plastics_and.html?hl=vi&id=HJr7aQKXAPQC

14. Ren PG, Liu XH, Ren F, Zhong GJ, Ji X, Xu L. Biodegradable graphene oxide nanosheets/poly-(butylene adipate-co-terephthalate) nanocomposite film with enhanced gas and water vapor barrier properties. *Polym Test*. 2017;58:173-180. doi : 10.1016/J.POLYMERTESTING.2016.12.022

15. Park HJ, Chinnan MS. Gas and water vapor barrier properties of edible films from protein and cellulosic materials. *J Food Eng*. 1995;25(4):497-507. doi : 10.1016/0260-8774(94)00029-9

16. Phùng TTT, Gerometta M, Chanut J, et al. Comprehensive approach to the protection and controlled release of extremely oxygen sensitive probiotics using edible polysaccharide-based coatings. *Int J Biol Macromol*. 2022;218:706-719. doi : 10.1016/J.IJBIOMAC.2022.07.129