



Crédit photo : PET- degrading enzyme Tournier et al., Nature, 2020

► Recyclage des plastiques par voie enzymatique



2025

Isabelle André, CNRS
Pierre-Benoit Joly, INRAE
Alain Marty, INSA
Magali Remaud-Siméon, INSA

Etude de cas du **centre INRAE Occitanie-Toulouse** réalisée selon la méthode ASIRPA (Analyse de l'impact sociétal de la recherche) mise au point par INRAE.

Résumé



8 avril 2020 : des chercheurs de TBI¹ et de leur partenaire Carbios publient dans la revue Nature un article au titre évocateur : « An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles ». Fait rare, la prestigieuse revue lui consacre sa page de couverture. Cet article majeur couronne une dizaine d'années de recherche et envoie un signal fort à l'ensemble des acteurs du monde politique et du monde des affaires. Le recyclage du plastique par voie enzymatique est possible dans des conditions industrielles et économiques viables. Par rapport au recyclage par voie thermomécanique, la voie enzymatique a l'avantage de restituer des monomères similaires à ceux obtenus par la voie pétrochimique. Cette voie permet d'atteindre dix cycles de recyclage contre trois ou quatre par voie thermomécanique, ce qui confère au « biorecyclage » un avantage déterminant.

Cette étude ASIRPA revient sur cette collaboration au long cours entre le pôle biocatalyse de TBI et la société Carbios créée en 2011. A partir d'un partenariat en recherche sur la biodégradation d'un polyester (le PLA - acide polylactique), s'est progressivement nouée une alliance stratégique entre TBI et la start-up. Carbios et TBI ont orienté leurs efforts vers le biorecyclage du polyéthylène téréphtalate (PET). S'appuyant sur le socle d'un potentiel exceptionnel de recherche-développement-innovation, Carbios a formulé un projet de grande ambition : devenir le leader mondial du biorecyclage ou de la biodégradation des plastiques. Compte tenu d'un contexte politique et géopolitique qui conduit à remettre en cause les politiques environnementales volontaristes, l'engagement des industriels dans la production et dans l'utilisation du PET biorecyclé est aujourd'hui incertain. Néanmoins, le partenariat a permis de franchir les principales étapes du chemin d'impact. Le succès qui reste à portée de main aura des effets économiques et environnementaux majeurs.

Summery



April 8, 2020: Researchers from TBI¹ and their partner Carbios published an article in the journal *Nature* with the evocative title: "An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles." In a rare move, the prestigious journal features it on its cover. This landmark article caps off a decade of research and sends a strong signal to all stakeholders in the political and business worlds. Enzymatic plastic recycling is possible under viable industrial and economic conditions. Compared to thermomechanical recycling, the enzymatic route has the advantage of producing monomers similar to those obtained through petrochemical processes. This method allows for up to ten recycling cycles, compared to three or four via thermomechanical methods, giving "biorecycling" a decisive advantage.

This ASIRPA study examines the long-term collaboration between TBI's biocatalysis division and Carbios, established in 2011. Starting with a research partnership on the biodegradation of a polyester (PLA—polylactic acid), a strategic alliance gradually developed between TBI and the startup. Carbios and TBI have focused their efforts on the biorecycling of polyethylene terephthalate (PET). Building on a foundation of exceptional research, development, and innovation potential, Carbios has set an ambitious goal: to become the global leader in biorecycling or biodegradation. Given the current political and geopolitical climate, which is casting doubt on proactive environmental policies, the commitment of manufacturers to the production and use of bio-based PET is now uncertain. Nevertheless, the partnership has enabled us to reach key milestones on the path to making an impact. The success that lies within reach will have significant economic and environmental benefits.

¹ Toulouse Biotechnology Institute

Problématiques sociétales initiales et contexte externe initial

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, la production de plastique a connu une croissance exponentielle, passant de 2 millions de tonnes en 1950 à près de 500 millions de tonnes par an dans le monde. Cette augmentation est liée à l'expansion de l'industrialisation, à la demande croissante de produits emballés, à la popularité des emballages à usage unique, ainsi qu'au développement de certains secteurs (électronique, automobile, aéronautique) qui utilisent des composants en plastique, ces facteurs étant amplifiés par la croissance démographique.

Les controverses liées à la production du plastique sont souvent centrées sur les conséquences environnementales négatives, notamment :

1. **Pollution plastique** : particulièrement visible dans les océans, affectant la vie marine et nuisant aux écosystèmes (les images de ces déchets plastiques ont suscité une prise de conscience mondiale), cette pollution est plus grave encore à l'échelle des microplastiques qui deviennent des contaminants retrouvés notamment dans l'ensemble des compartiments environnementaux (ex. sols) et écosystèmes et dans la chaîne alimentaire ; elle devient dès lors un enjeu sanitaire tout autant qu'environnemental.
2. **Durée de décomposition** : la plupart des plastiques mettent des centaines, voire des milliers d'années à se décomposer.
3. **Problèmes de recyclage** : il n'est pas toujours efficace et une majorité des plastiques utilisés finit dans des décharges ou incinérée.

Face à la gravité de ces problèmes, de nombreux groupes de défense de l'environnement appellent à mettre fin au « tout plastique ». C'est aussi un objet des politiques publiques, notamment en France et en Europe. Néanmoins, cette volonté est confrontée à une forte résistance, non seulement car elle est contraire aux intérêts des producteurs de plastique mais aussi parce que les systèmes de production, de distribution et de consommation sont fortement dépendants du plastique.

La frise chronologique proposée par l'IFPEN² (Figure 1) résume l'évolution des réglementations qui contraignent ou interdisent l'usage des plastiques en France, depuis les années 1990. Ces réglementations ont généralement leur parallèle en Europe.

² <https://www.ifpenouvelles.fr/ifpen/presentation>

LES PLASTIQUES EN FRANCE : ENTRE RECYCLAGE ET INTERDICTIONS

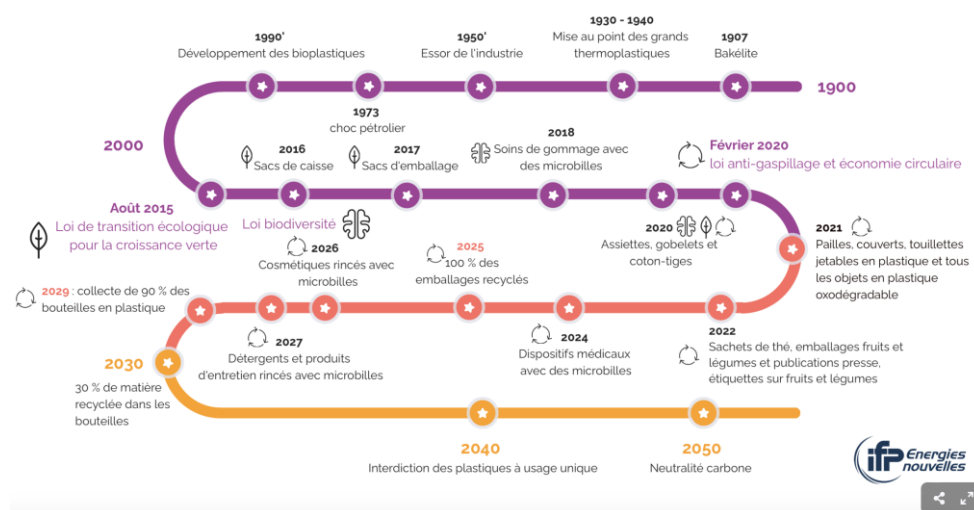


Figure 1 : Frise chronologique proposée par l'IFPEN

Compte tenu des limites des possibilités de réduction à la source, les plastiques biodégradables et le recyclage sont deux solutions promues par différentes réglementations. Alors qu'actuellement, le recyclage ne concerne que moins de 10% de l'ensemble des plastiques utilisés en Europe (Figure 2), les réglementations européennes fixent des objectifs ambitieux : 100% des emballages recyclés en 2025, 30% de matière recyclée dans les bouteilles en 2030, interdiction des plastiques à usage unique en 2040.

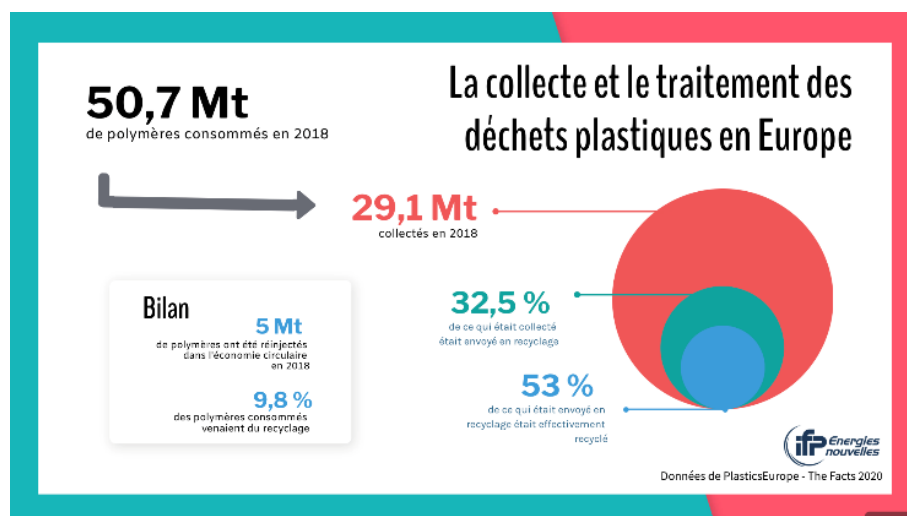


Figure 2 : La collecte et le traitement des plastiques en Europe

Les techniques thermomécaniques de recyclage connaissent néanmoins des limites manifestes. Les opérations de tri, lavage, broyage et extrusion ne débarrassent pas les polymères des additifs utilisés pour leur fabrication. De plus, les effets de températures associés aux différentes étapes du processus de recyclage sont à l'origine de dégradations de la matière première recyclée. Cela limite le recyclage mécanique tel qu'il est réalisé actuellement. Par exemple, le recyclage d'une bouteille est limité à 3 ou 4 cycles, après quoi la dégradation de la matière est trop importante.

Le recyclage enzymatique permet de dépasser ces limites en restituant des monomères similaires à ceux d'origine pétrochimique, ce qui permet d'envisager 10 cycles de recyclage compte tenu qu'à chaque cycle 90% des polymères sont hydrolysés.

Contributions de TBI et de ses partenaires

Dès la création de Carbios en 2011, se noue un partenariat stratégique étroit avec le pôle biocatalyse du LISBP (Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Biologiques et des Procédés), qui devient Toulouse Biotechnology Institute³ (TBI) en 2019. Se positionnant comme un leader des solutions biologiques des problèmes liés à l'usage des plastiques, Carbios a fait le choix de s'appuyer sur une recherche académique de haut niveau. La jeune start-up lance deux projets, l'un sur le PLA (acide polylactique) avec TBI, l'autre sur le PET (polyéthylène téréphtalate), d'abord avec l'université de Poitiers et le CNRS puis avec TBI.

Le projet PLA

L'acide polylactique (PLA) est un polyester biodégradable, fabriqué à partir de ressources renouvelables, telles que le maïs, la canne à sucre ou d'autres sources de biomasse. Il se décompose naturellement dans des conditions industrielles de compostage ($T^{\circ} > 60^{\circ}\text{C}$), ce qui en fait un matériau plus respectueux de l'environnement par rapport aux plastiques synthétiques traditionnels.

Les quantités de PLA utilisées dans le monde ont considérablement augmenté ces dernières années, en raison de l'intérêt croissant pour les matériaux biodégradables. En 2020, la production mondiale de PLA était estimée à environ 350 000 à 400 000 tonnes par an. La demande continue de croître, alimentée par divers secteurs comme l'emballage, les textiles, et l'impression 3D. On prévoit que cette croissance se poursuivra à un rythme rapide au cours de la prochaine décennie, en raison des initiatives visant à réduire les déchets plastiques et à promouvoir l'économie circulaire. On estime que la demande mondiale pourrait atteindre plusieurs millions de tonnes d'ici 2030. Bien que le PLA soit le polymère biosourcé le plus largement utilisé, son taux de biodégradation dans des conditions usuelles (compostage domestique, sol...) reste très faible.

La nouvelle technologie développée à Toulouse permet d'accélérer la biodégradation du PLA.⁴ Le PLA modifié est obtenu en insérant des enzymes présentant une activité de dégradation au cours de la phase d'extrusion du processus de fabrication des objets en PLA. Lorsque le PLA « enzymé » est exposé à des conditions humides, les enzymes catalysent la rupture des liaisons esters entre acide lactique du PLA. Le résultat de cette dégradation est la transformation du PLA en acide lactique et petits oligomères aisément biodégradables. Ainsi, le PLA « enzymé » est entièrement désintégré dans des conditions de compostage domestique en 20 à 24 semaines, puis biodégradé. Les propriétés mécaniques et de dégradation du film enzymé sont compatibles avec les applications d'emballage industriel.

Le saut inventif tient à deux contributions majeures :

³ <https://www.toulouse-biotechnology-institute.fr/presentation/>

⁴ Les résultats de ces recherches ont été publiés dans la revue Nature en 2024 :

Guicherd M., Ben Khaled M., Guérault M., Nomme J., Dalibey M., Grimaud F., Alvarez P., Kamionka E., Gavalda S., Noël M., Vuillemin M., Amillastre E., Labourdette D., Cioci G., Tournier V., Kitpreechavanich V., Dubois P., André I.*, Duquesne S., Marty A.* 2024. *An engineered enzyme embedded into PLA to make self-biodegradable plastic*. Nature 631: 884-890 DOI: 10.1038/s41586-024-07709-1

1/ Identification et ingénierie enzymatique d'une enzyme capable de dégrader le PLA (PLAase), incorporable lors de la production du PLA.

Une enzyme (la protéinase K de *Tritirachium album*) était connue pour sa capacité à hydrolyser le PLA. Cependant, son utilisation industrielle n'était pas possible compte tenu de sa très faible activité. Les enzymes sont introduites dans les matériaux PLA par le biais d'un processus d'extrusion industrielle à très haute température (minimum 160 °C). Il fallait donc trouver des protéines thermophiles à forte activité, ce qui n'était pas le cas de la protéinase K. Le premier défi technologique a consisté à développer des enzymes compatibles avec un tel processus en recherchant des PLAases candidates dans la diversité naturelle, puis en améliorant leur activité à l'aide de stratégies d'ingénierie rationnelle assistée par ordinateur. Deux PLAases natives, à savoir la PAM et la ProteinT, isolées d'organismes thermophiles, ont été identifiées et modifiées pour améliorer leur activité de dépolymérisation du PLA à pH 7,5 et 45 °C ; l'activité de la PAM a été multipliée par 4,5 par l'introduction de trois mutations (variante PAMFLI), et celle de la ProteinT a été multipliée par 80 avec six mutations (variante ProteinT^{FLTIER}). La ProteinT^{FLTIER}, la PLAase la plus efficace et la plus stable thermiquement, a donc été retenue.

2/ Dispersion uniforme de l'enzyme dans la matrice PLA au moyen d'un processus d'extrusion

La formulation enzymatique liquide a été incorporée dans le polycaprolactone, un polymère à basse température de fusion, par extrusion à 70 °C, formant un mélange maître (masterbatch) de polycaprolactone « enzymé ». Les granulés du mélange maître sont intégrés au PLA par extrusion à 160 °C, produisant un film de PLA enzymé (0,02 % d'enzyme).

Les recherches sur le PLA ont été soutenues par le projet compétitif OSEO-BPI Thanaplast 2012-2017, coordonné par Carbios, avec un budget global de 22 millions d'euros sur 5 ans (dont 9,2 millions d'euros attribués par Bpifrance). Le projet s'appuyait sur un partenariat large associant : INRA-TWB/LISBP⁵, CNRS, Université de Poitiers, Limagrain Céréales Ingrédients, le Groupe Barbier et Deinove. Le premier brevet sur la nouvelle technologie de fabrication du PLA enzymé a été déposé en 2014.⁶

Carbios a poursuivi l'industrialisation de son procédé de biodégradation au travers de la joint-venture Carbiolice, créée en 2016 avec Limagrain Céréales Ingrédients et le fonds SPI (Sociétés de Projets Industriels) de Bpifrance. Aujourd'hui, Carbiolice est 100% Carbios.

Les projets PET

Avec près de 100 millions de tonnes par an utilisées dans les textiles (60%) et les emballages (40%), le polyéthylène téréphtalate (PET) est le polymère le plus répandu au niveau mondial. Le principal processus de recyclage du PET, par voie thermomécanique, entraîne une perte des propriétés mécaniques. Par conséquent, la synthèse *de novo* est privilégiée.

Avec un taux élevé d'unités de téréphtalate aromatique, qui réduit la mobilité de la chaîne, le PET est un polyester extrêmement difficile à hydrolyser. Plusieurs enzymes hydrolysant le PET ont été rapportées, mais leur activité demeure cependant très limitée.

La nouvelle technologie se base sur l'identification d'une enzyme dont les propriétés ont ensuite été améliorées par ingénierie enzymatique guidée par des approches structurales et bioinformatiques. Ainsi, la LCC (*leaf-branch compost cutinase*), a été identifiée par une équipe japonaise comme étant l'enzyme la plus efficace en termes d'activité et de thermostabilité. Cependant, elle ne dégradait que

⁵ <https://www.inrae-transfert.fr/fr/104-2-demonstrateurs/313-twb-toulouse-white-biotechnology>

⁶ Alvarez P., Amillastre E. Duquesne S., Marty A. (2014) - WO/2016/062695 - Polypeptide présentant une activité de dégradation de polyester et utilisations de celui-ci. Déposé le 21/10/2014 au nom de Carbios, INRA, INSA Toulouse, CNRS. Publié le 28/04/2016.

3% de PET à 10 g/L en 16 semaines. Après amélioration par ingénierie enzymatique, le mutant de la LCC, appelé LCC^{CCG}, permet, en 10 heures, de dépolymériser à 72°C au moins 90% du PET (20% g/g) en monomères, avec une productivité de 16,7 grammes de téréphtalate par litre et par heure en utilisant 3 milligrammes d'enzyme par gramme de PET et 98% en 24h à 68°C ⁷.

Cette enzyme améliorée surpasse toutes les PET hydrolases connues auparavant, notamment du fait d'une thermostabilité et d'une activité nettement améliorée. Cette enzyme est aujourd'hui un standard international.⁸ Les monomères constitutifs du PET, l'acide téréphtalique et le monoéthylène glycol, peuvent ainsi être récupérés en conditions douces (60-70°C dans l'eau à pression atmosphérique), sans besoin de tri drastique des déchets. Les monomères peuvent alors être purifiés pour être repolymérisés en PET de qualité identique au PET vierge d'origine pétrochimique.

Les premiers brevets ont été déposés dès 2016.⁹ Ils revendiquent l'enzyme optimisée et ses variantes, les procédés de production de l'enzyme et ses utilisations pour dégrader les matériaux contenant du polyester, en particulier le PET.

Les recherches sur le PET ont été financées par le projet ADEME CE-PET¹⁰ 2018-2022 coordonné par Carbios, en collaboration avec INRAE et TWB¹¹. Elles ont conduit à la démonstration du procédé de dépolymérisation enzymatique en réacteurs de 1m³ dans le pilote de Carbios puis de 20m³ dans le démonstrateur industriel de Carbios. Le projet visait également à démontrer la possibilité de transformation du PET recyclé en produits tels que bouteilles et fil textile et à analyser les conditions de mise en place d'une nouvelle chaîne de valeur, de la collecte des déchets en amont à la mise sur le marché du PET biorecyclé en aval. Le montant du projet s'élève à 11,6 M€ dont 8,2 M€ d'aide de l'ADEME, dans le cadre du Programme Investissement d'Avenir (PIA)¹². Les premières bouteilles en PET 100% issues du recyclage de plastique usagé ont été produites dès 2019.

S'en est suivi le projet ADEME OPTI-ZYME¹³ 2023-2027 (budget global de 16.7 M€ dont 11.7 M€ d'aide) qui vise à explorer les leviers scientifiques et techniques permettant d'améliorer les performances économiques et environnementales afin de renforcer la flexibilité de la technologie, notamment pour sa capacité d'adaptation à une diversité de déchets. Il s'agit d'améliorer et de pérenniser son attractivité et son avantage compétitif et de renforcer la stratégie de diffusion de la technologie par

⁷ Tournier V., Topham V., Gilles A., David B., Folgoas C., Moya-Leclair E., Kamionka E., Desrousseaux M.L., Texier H., Cot M., Guémard E., Dalibey M., Nomme J., Cioci G., Barbe S., Château M., André I*, Duquesne S.*, Marty A.* 2020. *An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles*. Nature 580, 216–219 (2020). DOI: 10.1038/s41586-020-2149-4

⁸ Arnal G., Anglade J., Gavalda S., Tournier V., Chabot N., Bornscheuer U., Weber G., Marty A. 2023. *Assessment of Four Engineered PET Degrading Enzymes Considering Large-Scale Industrial Applications*. ACS Catalysis (JCR=13.70) 13:13156-66. DOI: 10.1021/acscatal.3c02922

⁹ Tournier V., Texier H., Desrousseaux M.-L., Topham C., André I., Barbe S., Duquesne S., Marty A. (2016) - WO 2018/011281 - Novel esterases and uses thereof. Déposé le 12/07/2016 au nom de CARBIOS. Publié le 18/01/2018.

Topham C., Texier H., Tournier V., Desrousseaux M.-L., Duquesne S., André I., Barbe S., Marty A. (2016) - WO 2018/011284 - Novel esterases and uses thereof. Déposé le 12/07/2016 au nom de CARBIOS. Publié le 18/01/2018.

¹⁰ <https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/485-ce-pet.html#>

¹¹ <https://www.toulouse-white-biotechnology.com/>

¹² <https://www.prefectures-regions.gouv.fr/occitanie/Grands-dossiers/Le-programme-des-investissements-d-avenir-PIA>

¹³ <https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/7190-opti-zyme-procede-de-recyclage-enzymatique-du-pet-aux-performances-optimisees.html#product-features>

cession de licences à des partenaires industriels. Le projet est coordonné par Carbios, en partenariat avec INRAE-TWB et l'INSA¹⁴ de Toulouse-TBI/CRITT Bioindustries/CRITT GPTE¹⁵.

Le partenariat CARBIOS -TBI

Ce partenariat au long cours est essentiel pour mobiliser l'ensemble des compétences nécessaires en termes de recherche, innovation et développement industriel. Le partenariat, initié avec le projet Thanaplast, s'est progressivement renforcé au fil du temps. TWB a joué un rôle facilitateur comme plateforme facilitant l'établissement des relations contractuelles pour les deux premiers grands projets de recherche. Les modèles de contrat qui offrent une solution complète pour la propriété intellectuelle et pour la valorisation ont permis de limiter les coûts de transaction qui constituent souvent un obstacle important pour les start-ups et pour les partenaires industriels.

Deux événements majeurs ponctuent cette trajectoire : la nomination d'Alain Marty, Professeur à l'INSA Toulouse au poste de directeur scientifique de Carbios en juin 2015 et la création en 2020 du Laboratoire commun INSA-Carbios « PoPlaB » (Polymers, Plastics and Biotechnology), hébergé à TBI. Le PoPlaB est entièrement dédié aux recherches sur le développement d'enzymes pour la dégradation des plastiques. Aujourd'hui 20 chercheurs Carbios travaillent conjointement avec les chercheurs de TBI pour atteindre les objectifs ambitieux fixés.

Carbios bénéficie ainsi d'un accès privilégié à un laboratoire internationalement reconnu et à des compétences de premier plan en ingénierie enzymatique. Les équipes de TBI ont joué un rôle essentiel pour l'identification des enzymes les plus appropriées, leur adaptation à des procédés industriels de recyclage. La notoriété de TBI est aussi un atout essentiel pour asseoir la crédibilité de Carbios et pour lever des capitaux pour financer ces innovations de rupture.

Le pôle de biocatalyse est investi dans l'obtention de financements qui contribuent au maintien de son engagement en recherche à visée applicative. La proximité des équipes de TBI et de celles de Carbios a été essentielle pour conduire les recherches sur les processus enzymatiques et les rendre compatibles aux conditions d'application industrielle répondant aux contraintes économiques. De telles conditions, cruciales pour le développement industriel, sont mal connues dans les laboratoires de recherche.

Fait remarquable, Carbios a joué un rôle de structuration de la communauté internationale en organisant deux congrès internationaux sur le biorecyclage des plastiques, le premier à Paris en décembre 2022, le second à Toulouse en octobre 2024. Ces congrès rassemblent plus d'une centaine de chercheurs des meilleures institutions travaillant sur le sujet : NTU Singapore¹⁶, University of Manchester¹⁷, CSIC¹⁸, Aarhus University¹⁹, Chinese Academy of Sciences²⁰, RWTH Aachen University²¹, Oakridge Nation Laboratory²²...

Avec le projet OPTI-ZYME, les deux partenaires amorcent un nouveau cycle de recherche dont les objectifs découlent de l'expertise acquise lors du développement industriel en cours du biorecyclage du PET. L'apprentissage résulte d'un double-engagement :

¹⁴ Institut national des sciences appliquées

¹⁵ <https://bioindustries.insa-toulouse.fr/presentation/>

¹⁶ Nanyang technological University : <https://www.ntu.edu.sg/>

¹⁷ <https://www.manchester.ac.uk/>

¹⁸ Consejo Superior de Investigaciones Científicas : Conseil national de la recherche espagnol : <https://www.csic.es/es>

¹⁹ <https://international.au.dk/>

²⁰ <https://english.cas.cn/>

²¹ Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule : École supérieure polytechnique de Rhénanie-Westphalie <https://www.rwth-aachen.de/go/id/a/?lidx=1>

²² <https://www.ornl.gov/>

- La création d'un démonstrateur industriel qui permet de préciser les enjeux du passage à l'échelle industrielle ;
- Le partenariat avec de grandes marques utilisatrices de PET, dans le domaine des emballages (L'Oréal, Nestlé Waters, Pepsico, Suntory) et des vêtements (Patagonia, Salomon, Puma, On running et PVH) afin de tester les PET recyclés dans leurs chaînes de production.

Le partenariat étroit, ancré dans le PoPlaB²³, a permis une traduction rapide de ces effets d'apprentissage en objectifs de recherche.²⁴

Réalisation et produits des recherches

PLA

Les principaux outputs sont :

- Des brevets

Alvarez P., Amillastre E. Duquesne S., Marty A. (2014)

WO/2016/062695

Polypeptide présentant une activité de dégradation de polyester et utilisations de celui-ci

Déposé le 21/10/2014 au nom de CARBIOS, INRA, INSA Toulouse, CNRS. Publié le 28/04/2016.

Dusséaux S., Lajus S., Verbeke J., Beopoulos A., Borsenberger V., Nicaud JM, Bordes F., Marty A. (2015)

WO 2017/108577

Recombinant yeast cells producing polylactic acid and the uses thereof

Déposé le 21/12/2015 au nom de CARBIOS, INRA, INSA Toulouse, CNRS. Publié le 29/06/2017.

Ces brevets revendiquent :

- L'enzyme isolée et sous sa forme transformée
- Le processus de production de l'enzyme
- Le processus d'incorporation de l'enzyme dans le PLA

- Une publication

Guicherd M., Ben Khaled M., Guérout M., Nomme J., Dalibey M., Grimaud F., Alvarez P., Kamionka E., Gavalda S., Noël M., Vuillemin M., Amillastre E., Labourdette D., Cioci G., Tournier V., Kitpreechavanich V., Dubois P., André I.*, Duquesne S., Marty A.* 2024. An engineered enzyme embedded into PLA to make self-biodegradable plastic. *Nature*, 631: 884-890 DOI: 10.1038/s41586-024-07709-1

Le décalage entre les recherches et la publication est en soi intéressant. L'une des auteures de l'article explique :

« La stratégie au début de CARBIOS n'était pas de publier. Donc des brevets ont été pris et la recherche sur le PLA s'est plus ou moins arrêtée quand nous avons commencé à travailler sur le PET qui avait un plus grand marché. Nous avons donc mis tous nos efforts sur le PET, et c'est ce qui a été valorisé par l'article Nature en 2020. Quand nous avons vu la portée qu'avait l'article sur le PET, nous avons décidé de reprendre les travaux sur le PLA et de refaire les manipulations »

²³ Création Laboratoire commun INSA-Carbios « PopLab », hébergé à TBI

²⁴ En cela, le cas offre une illustration parfaite du schéma d'innovation en chaîne proposé par Kline et Rosenberg en 2002 : Kline, S. J., & Rosenberg, N. (2002). "An Overview of Innovation." In *The Oxford Handbook of Innovation*, edited by Fagerberg, J., Mowery, D. C., & Nelson, R. R. Oxford University Press, 2002, pp. 2-19.

nécessaires pour les standards de Nature. L'article a été soumis en 2023 et publié en 2024. »
(Échange de courriel, 28 février 2025).

Contrairement à une idée répandue, la publication n'est pas antinomique de la valorisation industrielle. Au contraire, une publication dans une revue internationale prestigieuse constitue un signal pour l'ensemble des acteurs industriels et politiques. La crédibilité scientifique peut alimenter un cycle de crédibilité industriel. C'est un atout important pour lever des fonds et mobiliser des utilisateurs potentiels.

PET

Pour les PET, compte tenu des enjeux économiques, la stratégie de protection de la propriété intellectuelle a été particulièrement active. L'encadré 1, liste les brevets co-inventés par des chercheurs de TBI et de Carbios, tous déposés par Carbios.²⁵ Cette modalité de protection de la propriété intellectuelle est l'une des spécificités des modèles contractuels de TWB. Les brevets sur des inventions sur des technologies compétitives ciblées sont déposés par le partenaire industriel, ce qui sécurise son investissement et favorise le développement des applications.²⁶

Encadré 1. Les brevets Carbios sur la biodégradation du PET

Desrousseaux ML., Texier H., Duquesne S., Marty A., Aloui Dalibey M., Château M. (2016)

WO 2017/198786

A process for degrading plastic products

Déposé le 19/05/2016 au nom de CARBIOS. Publié le 23/11/2017.

Tournier V., Texier H., Desrousseaux M.-L., Topham C., André I., Barbe S., Duquesne S., Marty A. (2016)

WO 2018/011281

Novel esterases and uses thereof.

Déposé le 12/07/2016 au nom de CARBIOS. Publié le 18/01/2018.

Topham C., Texier H., Tournier V., Desrousseaux M.-L., Duquesne S., André I., Barbe S., Marty A. (2016)

WO 2018/011284

Novel esterases and uses thereof.

Déposé le 12/07/2016 au nom de CARBIOS. Publié le 18/01/2018.

Marty A., Duquesne S., Guicherd M., Vuillemin M., Benkhaled M., (2016)

WO2018/109183

Improved plastic degrading proteases.

Déposé le 16/12/2016 au nom de CARBIOS. Publié le 21/06/2018.

Guicherd M., Duquesne S., Marty A., André I., Gueroult M. (2017)

WO 2019/122308

Novel proteases and uses thereof.

Déposé 21/12/2017 au nom de CARBIOS. Publié le 27/06/2019.

David B., André I., Ben Khaled M., Duquesne S., Marty A. (2018)

WO 2020/021116.

Novel esterases and uses thereof.

Déposé le 27/07/2018 au nom de CARBIOS. Publié le 30/01/2020

André I. Tournier V., Gilles A., Duquesne S. (2018)

WO 2020/021117

Novel esterases and uses thereof.

Déposé le 27/07/2018 au nom de CARBIOS. Publié le 30/01/2020.

²⁵ Nous nous limitons ici aux brevets co-inventés et ne reprenons pas les brevets de Carbios sans co-inventeurs de TBI.

²⁶ « Le brevet crédibilise la technologie, comme a pu également le faire notre article paru dans la prestigieuse revue scientifique Nature, et nous aide également à lever les fonds nécessaires à notre développement. » Martin Stephan, 6/4/2021 (<https://www.modeintextile.fr/interview-martin-stephan-directeur-general-delegue-carbios/>).

Duquesne S., Tournier V., Marty A. (2018)
 WO 2020/021118
 Novel esterases and uses thereof.
 Déposé le 27/07/2018 au nom de CARBIOS. Publié le 30/01/2020

Duquesne S., Gavalda S., Ben Khaled M. (2019)
 WO 2021/099337
 Novel proteases and uses thereof.
 Déposé le 18/11/2019 et le 16/12/2019 au nom de CARBIOS. Publication le 27/05/2021.

Bouchiba Y., Barbe S., Duquesne S., André I. (2020)
 WO 2022/144247
 Novel proteases and uses thereof.
 Déposé le 30/12/2020 au nom de CARBIOS. Publication le 07/07/2022.

Marty A., André I., Arnal G., Duquesne S., Gavalda S., Guérault M., Tournier V. (2021)
 WO2023/088908
 Novel esterases and uses thereof.
 Déposé le 16/11/2021 au nom de CARBIOS. Publication le 25/05/2023

Lippens G., Charlier C., Ben Khaled M., André I., Guérault M. (2021)
 WO2023/088909
 Novel esterases and uses thereof.
 Déposé le 16/11/2021 au nom de CARBIOS. Publication le 25/05/2023

Marty A., Arnal G., Duquesne S., Tournier V., Gilles A. (2021)
 WO2023/088910
 Novel esterases and uses thereof.
 Déposé le 16/11/2021 au nom de CARBIOS. Publication le 25/05/2023

Marty A., Duquesne S., Guicherd M., Guérault M., André I. (2023)
 EP4438725
 Novel proteases and uses thereof
 Déposé le 31/03/2023 au nom de CARBIOS. Publication le 02/10/2024.

Parallèlement, les équipes publient dans des revues prestigieuses, notamment dans Nature. L'article publié en 2020 est sélectionné pour la page de couverture de la revue. Carbios bénéficiera largement de cette distinction majeure en termes d'appui politique et pour ses levées de capitaux.

1. Charlier C, Gavalda S, Grga J, Perrot L, Gabrielli V, Löhr F, Schörghuber J, Lichtenecker R, Arnal G, Marty A, Tournier V, Lippens G.* Exploring the pH dependence of an improved PETase. *Biophys J.* 2024 Jun 18;123(12):1542-1552. doi: 10.1016/j.bpj.2024.04.026. Epub 2024 Apr 25. PMID: 38664965; PMCID: PMC11213969
2. Guicherd M., Ben Khaled M., Guérault M., Nomme J., Dalibey M., Grimaud F., Alvarez P., Kamionka E., Gavalda S., Noël M., Vuillemin M., Amillastre E., Labourdette D., Cioci G., Tournier V., Kitpreechavanich V., Dubois P., André I.*, Duquesne S., Marty A.* 2024. An engineered enzyme embedded into PLA to make self-biodegradable plastic. *Nature* 631: 884-890 DOI: 10.1038/s41586-024-07709-1
3. Tournier V., Duquesne S., Guillaumot F., Cramail H., Taton D.*, Marty A.*, André I*. 2023. Enzymes' power for plastics degradation. *Chemical Reviews* 123:5612-5701. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00644
4. Arnal G., Anglade J., Gavalda S., Tournier V., Chabot N., Bornscheuer U.*, Weber G.*, Marty A.* 2023. Assessment of Four Engineered PET Degrading Enzymes Considering Large-Scale Industrial Applications. *ACS Catalysis* 13:13156-66. DOI: 10.1021/acscatal.3c02922
5. Charlier C., Gavalda S., Borsenberger V., Duquesne S., Marty A., Tournier V., Lippens G.* 2022. An NMR look at an engineered PET depolymerase. *Biophys. J.* 121(15): 2882-2894. doi: 10.1016/j.bpj.2022.07.002

6. Tournier V., Topham V., Gilles A., David B., Folgoas C., Moya-Leclair E., Kamionka E., Desrousseaux M.L., Texier H., Cot M., Guémard E., Dalibey M., Nomme J., Cioci G., Barbe S., Château M., André I.*, Duquesne S.*, Marty A.* 2020. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. Nature 580, 216-219 (2020). DOI: 10.1038/s41586-020-2149-4 Article sélectionné en page de couverture.

Circulation des connaissances et intermédiaires

A la fois pour le PLA et pour le PET, le partenariat TBI/Carbios joue un rôle essentiel qui, comme on l'a indiqué, se renforce en 2015 avec la nomination d'Alain Marty au poste de directeur scientifique de Carbios et par la création en 2020, du Laboratoire commun INSA-Carbios « PopLaB », hébergé à TBI. Carbios joue donc un rôle essentiel dans la chaîne des traductions des brevets vers le développement industriel.

Le chemin d'impact des PLA est relativement simple. En 2016, Carbios et Limagrain créent la société Carbiolice pour commercialiser l'enzyme encapsulée nommée Carbios Active. L'enzyme encapsulée est facile à intégrer au moment de la fabrication des produits en PLA.

Pour le PET, Carbios travaille à trois niveaux :

- Le développement de l'enzyme,
- La maîtrise du processus industriel,
- Le développement des usages du PET recyclé.

Afin d'assurer une diffusion mondiale à la nouvelle technologie, Carbios mise sur une stratégie de cession de licences à des partenaires industriels qui investiront dans l'outil industriel. Pour ce faire, il est essentiel de maîtriser les grandes étapes du développement industriel et d'en faire la démonstration. En 2020, Carbios conclut un accord avec Technip Energies, leader mondial de l'ingénierie pour le développement industriel du procédé de recyclage enzymatique du PET. Technip Energies apporte son savoir-faire technologique en matière de conception et de commercialisation de nouveaux procédés. Carbios et Technip ont collaboré pour la conception du démonstrateur industriel du recyclage enzymatique installé à Clermont-Ferrand et inauguré en 2021.

Antoine Sévenier, Directeur du développement industriel de Carbios commente :

« Le démonstrateur permettra notamment de tester différents flux de déchets ; et de potentiellement adapter certaines étapes de notre procédé aux spécificités des systèmes de collecte. Je suis très enthousiaste à l'idée de voir notre technologie révolutionnaire s'industrialiser et devenir une réalité commerciale dans un futur proche. » (Juin 2020)²⁷

En 2023, Carbios signe un accord exclusif avec Novozyme (devenu Novonesys en 2024) pour la production et la fourniture des enzymes de dégradation du PET développées par Carbios. Carbios avait déjà un partenariat depuis 2019 avec le leader mondial des solutions biologiques pour la production de la PLAase, mais ce nouvel accord exclusif est d'une toute autre importance stratégique. Dans la perspective du démarrage de la première usine de recyclage du PET à Longlaville en Meurthe et Moselle, prévu initialement en 2025, il s'agit pour Novonesys de fournir les enzymes à tous les futurs

²⁷ <https://www.carbios.com/fr/lancement-de-la-construction-du-demonstrateur-industriel-de-carbios-derniere-etape-avant-la-commercialisation-de-sa-technologie-de-recyclage-du-pet/>

licenciés de la technologie de Carbios. Avec ce nouvel accord exclusif et à long terme, les deux entreprises visent à s'imposer comme les leaders mondiaux du biorecyclage du PET.²⁸

Carbios entreprend aussi un travail d'intéressement des utilisateurs finaux pour l'utilisation du PET recyclé. Le PET biorecyclé est plus cher que le PET pétro-sourcé mais aussi que le PET recyclé par les moyens thermo-mécaniques²⁹ et son utilisation comporte des incertitudes. Pour convaincre les grandes marques, Carbios crée deux consortia, le premier consacré aux bouteilles et emballages, le second aux vêtements, afin de tester l'utilisation du PET biorecyclé. Pour ces grandes marques, le partenariat avec Carbios s'inscrit dans leur stratégie de développement durable.

Fin 2024, Carbios et ses partenaires de l'industrie du vêtement (On, Patagonia, PUMA, Salomon, PVH) annoncent la production du premier T-Shirt avec la technologie « fibre à fibre », uniquement à partir de fibres recyclées (Figure 4).



Figure 4. Le premier T-Shirt produit à partir de fibres recyclées, octobre 2024
(Source : site internet de Carbios)

Anne-Laure Descours, Chief Sourcing Officer de PUMA commente cette première :

« Ce t-shirt est le premier résultat concret de notre consortium « fibre à fibre » avec CARBIOS. Il nous a fait surmonter des défis dans le domaine textile pour parvenir à créer un vêtement à partir de déchets recyclés enzymatiquement qui soit de même qualité que celle offerte par des fibres vierges. Il continue d'illustrer, après Index – la première chaussure recyclable, l'engagement de Salomon en faveur de la circularité des matières, tout comme nos efforts pour réduire les déchets industriels ainsi que l'empreinte carbone de 30 % d'ici à 2030. Ce projet, mené à bien en collaboration avec des partenaires de marques de chaussures et de vêtements, montre combien nous faisons ensemble figure de leaders et partageons une vision commune pour faire évoluer l'industrie textile et de la chaussure vers plus de durabilité. » (Octobre 2024)

²⁸<https://www.carbios.com/newsroom/carbios-et-novozymes-renforcent-leur-collaboration-par-un-partenariat-strategique-exclusif-et-a-long-terme-afin-dassurer-le-leadership-mondial-du-biorecyclage-du-pet/>

²⁹ Les prix sont environ de : 1000€/t pour le PET pétro-sourcé, 1600€/t pour le thermomécanique, 2500€/t pour l'enzymatique. Même si cette différence ne pèse que quelques dizaines de centimes au niveau du produit final (3cts de PET dans une bouteille, 15cts dans un T-shirt), elle constitue un obstacle dans des secteurs où la concurrence se fait sur les prix.

Chronologie

Même si les cas du recyclage du PLA et du PET sont étroitement liés, pour plus de clarté, nous proposons de présenter deux chronologies distinctes.

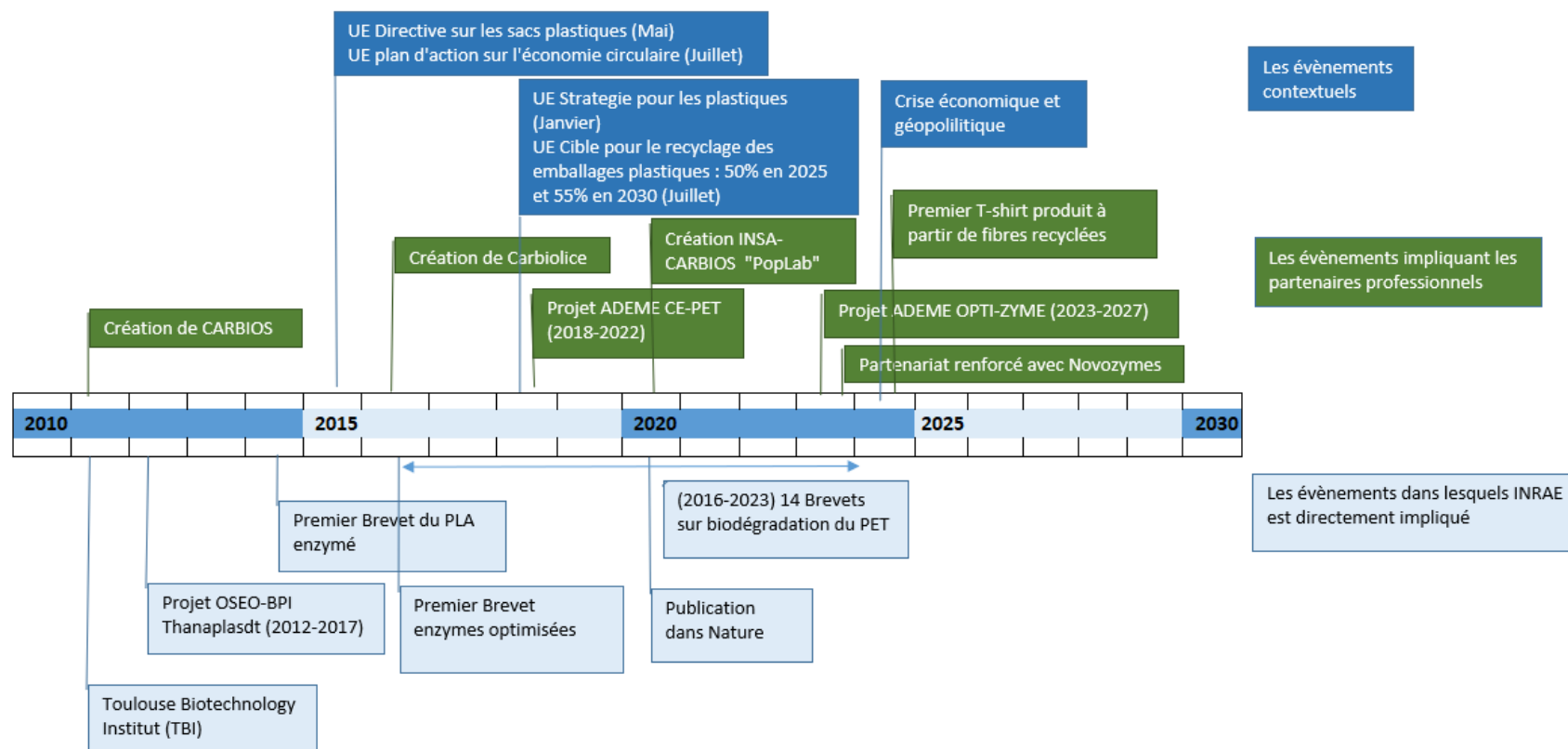
PLA

Date	Événements internes	Événements externes
2011	Création de Carbios	Lancement PIA1
2012	Début des recherches Projet compétitif OSEO-BPI THANAPLAST 2012-2017 coordonné par Carbios	
2014	Premier brevet sur le PLA Alvarez P., Amillastre E. Duquesne S., Marty A. (2014) WO/2016/062695 Polypeptide présentant une activité de dégradation de polyester et utilisations de celui-ci. Déposé le 21/10/2014 au nom de CARBIOS, INRA, INSA Toulouse, CNRS. Publié le 28/04/2016.	
2015		EU Directive on plastic bags (May) EU Action plan for a circular economy (July)
2016	Création de Carbiolice, j.v. Carbios – Limagrain céréales ingrédients	France commits to 100% recycled by 2025
2017		EU strategy for plastic (January) Package new plastic recycling targets: 50% by 2025 and 55% by 2030 (July)
2020	Création du Laboratoire commun INSA-Carbios « PopLaB », hébergé à TBI	France: Ban on single-use plastic straws, plates, cutlery, and disposable cups
2024	Publication dans Nature : Guicherd M., Ben Khaled M., Guérout M., Nomme J., Dalibey M., Grimaud F., Alvarez P., Kamionka E., Gavalda S., Noël M., Vuillemin M., Amillastre E., Labourdette D., Cioci G., Tournier V., Kitpreechavanich V., Dubois P., André I.*, Duquesne S., Marty A.* 2024. <i>An engineered enzyme embedded into PLA to make self-biodegradable plastic.</i> Nature (JCR = 50.5) 631: 884-890 DOI: 10.1038/s41586-024-07709-1	

PET

Date	Evénements internes	Evénements externes
2011	Création de Carbios	Lancement PIA1
2015		EU Directive on plastic bags (May) EU Action plan for a circular economy (July)
2016	Dépôt de 4 brevets, dont les 2 premiers sur la technologie PET :	
2017	1 brevet Partenariat Carbios - Technip Energies pour le développement industriel du procédé de recyclage enzymatique du PET	France commits to 100% recycled by 2025
2018	3 brevets Projet ADEME CE-PET 2018-2022 coordonné par Carbios	EU strategy for plastic (January) Package new plastic recycling targets: 50% by 2025 and 55% by 2030 (July)
2019	1 brevet Production des premières bouteilles en PET 100% issues du recyclage de plastique usagé	Directive « Single use plastics » . 90% collection rate target for plastic drink bottles by 2019 . A mandatory minimum target of 30% recycled content in new plastic bottles by 2030
2020	Article dans Nature (sélectionné pour la page de couverture de la revue) 1 brevet Création Laboratoire commun INSA-Carbios « PopLab », hébergé à TBI	France: Ban on single-use plastic straws, plates, cutlery, and disposable cups
2021	3 brevets Inauguration du démonstrateur industriel de recyclage enzymatique à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)	
2023	Partenariat renforcé avec Novozyme pour la production industrielle des enzymes Carbios obtient le permis de construire et d'exploitation dans le respect du planning annoncé pour la première usine au monde de biorecyclage de PET à Longlaville Projet ADEME Opti-Zyme 2023-2027 coordonné par Carbios 1 brevet 2 publications	
2024	Premier T-shirt entièrement produit à partir de fibres recyclées Report de la construction de l'usine de Longlaville	Crise économique et géopolitique qui provoque des problèmes de financement et conduit au retard de l'implantation de l'usine

CHRONOLOGIE



Impacts

Ces recherches finalisées ont eu pour effet de coupler impact scientifique et impact sociétal. L'impact scientifique se décline comme suit :

- la mise en place d'un test de dégradation pour le PET qui fait référence dans la communauté scientifique mondiale ;
- la démonstration de la puissance de l'ingénierie d'enzymes notamment fondée sur les approches computationnelles ;
- l'encouragement à poursuivre des recherches sur d'autres polymères dont certains sont beaucoup plus récalcitrants à la dégradation. De nombreux programmes européens et dans le monde sont en cours.

Concernant les impacts sociétaux, ces recherches démontrent la pertinence de la biocatalyse pour apporter des solutions à des problèmes environnementaux :

- Côté PLA : En 2024, Carbios Active a été certifiée par le Biodegradable Products Institute (BPI), la principale autorité nord-américaine en matière de produits et d'emballages compostables. Le produit a été inscrit dans l'inventaire de la Food and Drug Administration (FDA) des substances en contact avec les aliments. Carbios est en attente des autorisations pour commercialiser son produit sur le marché européen.
- Le potentiel d'impact majeur est lié au recyclage enzymatique du PET, l'un des principaux polymères utilisés avec un volume mondial de l'ordre de 100 millions de tonnes.

Alors que le marché du PET croît de 4% par an, celui du recyclage devrait croître de 14% par an. On estime qu'en 2035 plus de 30% du PET devrait être recyclé.³⁰

Sur la base des travaux communs avec TBI, Carbios a investi en recherche-développement pour passer toutes les étapes du TRL³¹. Avec les travaux réalisés sur son démonstrateur clermontois, Carbios a pu définir précisément l'ensemble du process, de la collecte des déchets à la production de monomères. Le partenariat avec les grands utilisateurs a permis de réaliser des preuves de concept pour la production de produits à partir du PET recyclé.

Carbios a annoncé en 2022, la construction de la première usine mondiale de biorecyclage de PET à Longlaville. Ce projet stratégique qui bénéficie d'un fort soutien du gouvernement français et de la région Grand-Est a été salué lors de son annonce par le ministre de l'économie Bruno Lemaire.³² Carbios est l'un des succès cités par le Président de la République lors de la présentation du bilan de France 2030 à Toulouse en décembre 2023. Depuis lors, l'entreprise connaît des difficultés qui se traduisent par plusieurs annonces : report de la construction de l'usine de Longlaville de 2025 à 2026, changements de présidence et de direction générale, réorganisation et réduction des effectifs qui pourraient affecter 40% des 160 salariés. La priorité de l'entreprise est de signer les premiers contrats de cession de licence de la technologie.

Ces éléments conduisent à préciser la singularité de ce cas. A partir d'un partenariat en recherche sur le PLA, s'est progressivement nouée une alliance stratégique entre TBI et la start-up. S'appuyant sur le socle d'un potentiel exceptionnel de recherche-développement-innovation, Carbios a formulé un projet de grande ambition : devenir le leader mondial du biorecyclage des plastiques.

³⁰ Carbios assumptions, IHS Markit in 2021, Market Research Future in 2021 and KPC in 2022

³¹ <https://www.grenoble-inp.fr/fr/recherche-valorisation/trl-a-quoi-ca-sert>

³² <https://www.carbios.com/fr/carbios-indorama-france/>

Les changements politiques et géopolitiques qui se sont faits jour depuis l'attaque de l'Ukraine par la Russie changent la donne. La souveraineté et la compétitivité économique prennent le pas sur la protection de l'environnement. Les élections étatsuniennes de novembre 2024 et les mesures annoncées avec l'installation de l'administration Trump renforcent cette tendance, soulignant notamment l'enjeu de la souveraineté militaire. Dans ce nouveau contexte, le climat et l'environnement sont des sujets moins prioritaires. Les grandes marques sont moins enclines à confirmer leur engagement en faveur de la durabilité, y compris pour ce qui concerne le recyclage des plastiques.

Les acteurs avec lesquels Carbios discute de la cession de licences évoquent, chacun, un potentiel de plusieurs millions de tonnes par an. A l'horizon 10 ans, un scénario d'une dizaine de millions de tonnes par an est vraisemblable.³³

Cela conduit à formuler les appréciations suivantes concernant l'impact potentiel.

Économique

L'impact économique de premier niveau :

- PLA : début des ventes annuelles de Carbios Active en 2024,
- PET : usine de Longlaville d'une capacité de traitement de 50 000 tonnes /an.

L'impact économique de second niveau :

- PLA : marchés européens / quelle estimation ?
- PET : dans l'hypothèse favorable d'un volume d'une dizaine de millions de tonnes de PET recyclé, le chiffre d'affaires annuel de l'activité serait de plus de 20 milliards €/an.

Le calcul du surplus économique des activités PET n'a rien d'évident car le biorecyclage vient probablement se substituer au recyclage thermomécanique qui est moins onéreux mais moins qualitatif.

Politique

L'impact politique est difficile à estimer. Néanmoins, on peut considérer que le fait de disposer d'une solution durable facilite la mise en œuvre de politiques de sortie du « tout plastique ».

Une activité remarquable pour illustrer cet impact : TBI et Carbios ont été auditionnés le 2 février 2023 par l'OPECST³⁴ (Sénatrice Mme Angèle Prévile et Député M. Philippe Bolo) pour rédiger une note scientifique sur le recyclage enzymatique du plastique. Cette audition a permis de mettre en lumière la spécificité et l'intérêt des technologies enzymatiques par rapport aux autres voies de recyclage et d'élimination des plastiques. Les travaux de TBI/Carbios ont ainsi contribué à la réflexion sur les technologies enzymatiques de recyclage et elles ont influencé les réglementations et sources de financements dédiées pour développer ces technologies.

³³ Hypothèses :

. utilisation mondiale du PET : 100 millions de tonnes/an
. % de PET recyclé : 30% (objectif 2030 de la Commission européenne)
. % du PET biorecyclé dans le PET recyclé : 33%.

³⁴ Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques : <https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/17/organes/delegations-comites-offices/opecst>

Environnemental

La stratégie développée est étroitement liée à la politique de collecte et de tri des déchets pour une réutilisation afin d'éviter tout relargage dans l'environnement et diminuer l'impact sur la production des nano et micro-plastiques. Par rapport à la source pétrochimique, le PET recyclé permet une réduction de 90% des émissions de gaz à effet de serre.

La contribution est donc potentiellement majeure, même si la part du biorecyclage restera probablement faible par rapport aux volumes considérables de PET utilisés au niveau international, un dixième des besoins dans un scénario favorable.

Dans ce contexte, la promesse du recyclage (a fortiori du biorecyclage) est parfois utilisée par les lobbys du plastique³⁵ pour s'opposer aux politiques visant à réduire l'usage des plastiques à la source. En donnant l'impression qu'une solution technique existe, ces stratégies vont à l'encontre d'un consensus d'experts en faveur d'une réduction drastique de l'usage du plastique à la source.³⁶ C'est un effet pervers de la solution qui doit faire l'objet de la plus grande vigilance des acteurs des filières. Ces aspects, dans une dimension néanmoins plus holistique, sont abordés dans l'Expertise Scientifique Collective menée conjointement par INRAE et le CNRS et dressant un état des connaissances scientifiques sur les plastiques utilisés en agriculture et pour l'alimentation depuis leur production jusqu'à leurs devenir et impact dans l'environnement et pour la santé humaine.³⁷

Sanitaire

Les recherches sur l'impact des micro et nano-plastiques sont en cours. La présomption de risques sanitaires est forte compte tenu des propriétés de perturbateurs endocriniens et autres propriétés potentiellement délétères des substances chimiques (ex. additifs) contenues dans les plastiques.

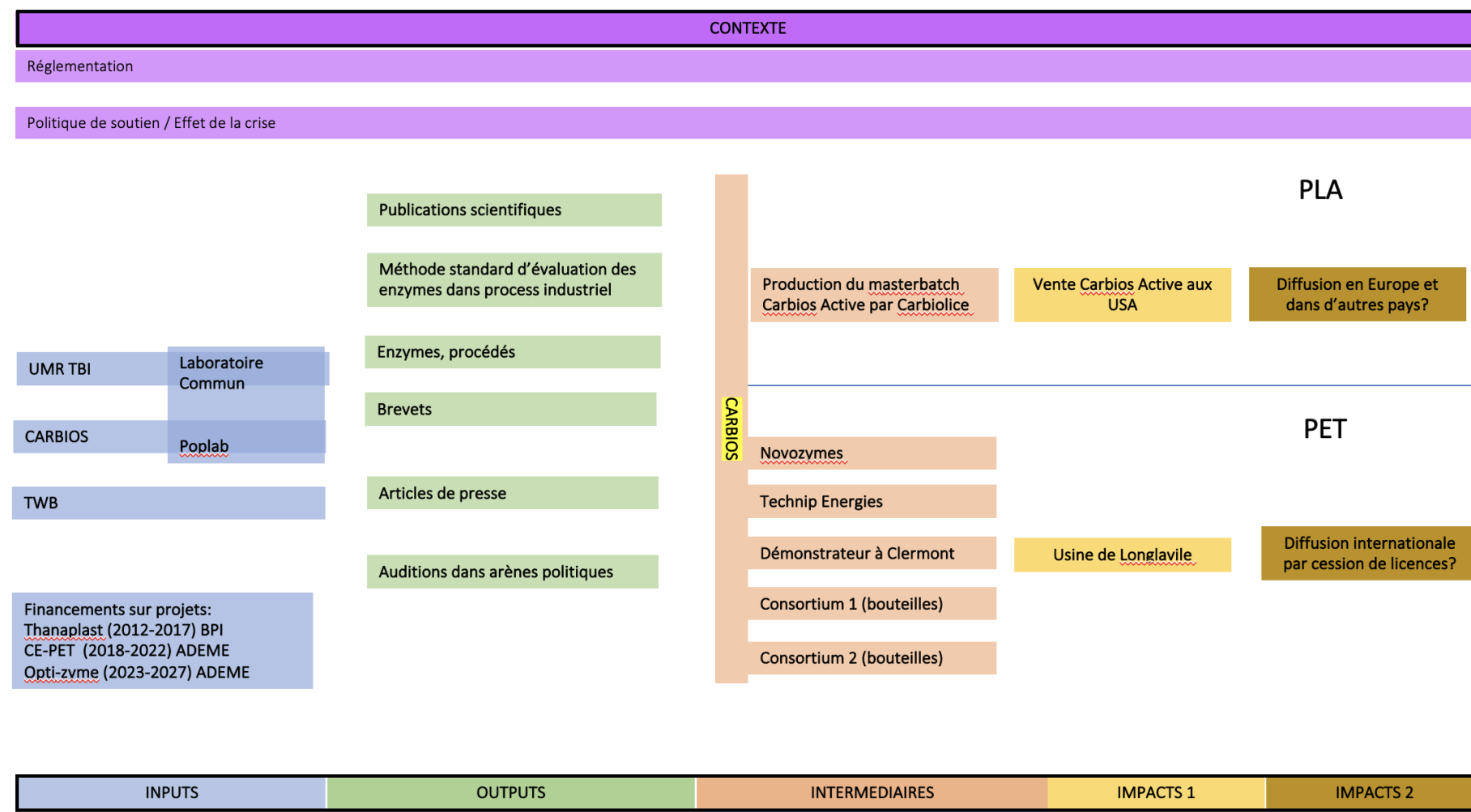
Néanmoins, l'impact sanitaire du biorecyclage dépendra de son effet sur les volumes de PET qui se retrouvent dans l'environnement. Or, nous avons vu au point précédent que cet effet est faible et ambivalent.

³⁵ Voir notamment les positions de Polyvia (organisation professionnelle des entreprises de plasturgie) et Elipso (syndicat des entreprises de l'emballage plastique). Suite à une étude réalisée par le Center for International Environmental Law (CIEL), il a été constaté que 220 lobbyistes issus des secteurs des combustibles fossiles et des produits chimiques, un chiffre record parmi toutes les négociations examinées par CIEL, ont pu participer à la cinquième session du Comité intergouvernemental de négociation (INC-5, Busan, Corée du Sud, novembre-décembre 2024) dédiée à l'élaboration du traité international pour mettre fin à la pollution plastique. (<https://www.ciel.org/news/inc-5-lobbyist-analysis/>).

³⁶ Baztan J, Jorgensen B, Carney Almroth B, Bergmann M, Farrelly T, Muncke J, Syberg K, Thompson R, Boucher J, Olsen T, Álava J-J, Aragaw TA, Bailly D, Jain A, Bartolotta J, Castillo A, Collins T, Cordier M, De-Falco F, Deeney M, Fernandez M, Gall S, Gammage T, Ghiglione J-F, Gündoğdu S, Hansen T, Issifu I, Knoblauch D, Wang M, Kvale K, Monsaingeon B, Moon S, Morales-Caselles C, Reynaud S, Rodríguez-Seijo A, Stoett P, Varea R, Velis C, Villarrubia-Gómez P and Wagner M (2024). Primary plastic polymers: Urgently needed upstream reduction. Cambridge Prisms: Plastics, 2, e7, 1–2 <https://doi.org/10.1017/plc.2024.8>.

³⁷ <https://esco-plastiques-agri-alim.colloque.inrae.fr/programme>

Chemin d'impact



Les impacts en résumé

Dimension d'impact	Notation de l'importance de l'impact : de 1 à 5 ou faible, moyen, fort	Résumé de chacun des impacts
Economique	5	PLA : Vente Carbios Active aux USA PET : usine de Longlaville
Environnemental	+/- 1	La promesse du recyclage (a fortiori du biorecyclage) est parfois utilisée par les lobbys du plastique pour s'opposer aux politiques visant à réduire l'usage des plastiques à la source
Sanitaire	0	
Territorial-social	0	
Politique	1	On peut considérer que le fait de disposer d'une solution durable facilite la mise en œuvre de politiques de sortie du « tout plastique »

Source des données – Références

Chalmin, P. (2019). L'histoire des plastiques : du Capitole à la Roche Tarpéienne, *La Revue de l'Institut Veolia*, pp.6-11.

Gontard, N. (2018). Déchets plastiques : la dangereuse illusion du tout-recyclage, *The Conversation*, janvier 2018 (<https://theconversation.com/dechets-plastiques-la-dangereuse-illusion-du-tout-recyclage-90359>)

OECD (2024). Achieving the goal to eliminate plastic pollution requires ambitious action by all countries, with policy measures implemented at all stages of the plastics lifecycle https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/10/policy-scenarios-for-eliminating-plastic-pollution-by-2040_28eb9536/76400890-en.pdf

Cette étude de cas a été réalisée par le **centre INRA Occitanie-Toulouse** selon la méthode ASIRPA (Analyse de l'impact sociétal de la recherche) mise au point par INRAE.

Pour en savoir plus sur la méthode : <https://www6.inrae.fr/asirpa/>

Auteurs principaux : Isabelle André, Pierre-Benoit Joly, Alain Marty, Magali Remaud-Siméon

Photo de couverture : PET-degrading enzyme Tournier et al., nature, 2020

Ce document est sous licence Creative Commons BY NC SA : Attribution – Utilisation non commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions.



> Pour citer ce document : Isabelle André, Pierre-Benoit Joly, Alain Marty, Magali Remaud-Simeon, *Recyclage des plastiques par voie enzymatique*, Rapport ASIRPA, 2026, INRAE, 22 pages.

HAL: **hal-05600524v1**

> Contact : asirpa@inrae.fr